

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

**Analýza technologie tváření monobloku železničního
kola**

Technology Analysis of Railway Wheel Forming

Student: Bc. Martin Gorol
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava 2010

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 24. 5. 2010

Martin Gorol
.....

Plné jméno autora

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Gorol

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Libina 769

788 05

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě21.5. 2010.....

.....*Martin Goul*.....

Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

GOROL, M. *Analýza technologie tváření monobloku železničního kola: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 73 s. Vedoucí práce: Hrubý, J.

Diplomová práce se zabývá analýzou technologie tváření monobloku železničního kola. V úvodní části je proveden rozbor celkové technologie výroby monobloku kola. V další části je realizován matematický model tvářecích operací pěchování, tvarování a válcování pomocí simulačního softwaru QForm. Matematický model, vycházející z metody konečných prvků, byl vytvořen na základě materiálových zkoušek, výkresové dokumentace a provozních podmínek tvářecích operací, které byly získány měřením. Z dosažených výsledků simulace je proveden rozbor simulovaných operací a analýza opotřebení a životnosti komponent tvářecích nástrojů. Závěrečná část práce se věnuje odhadu životnosti jednotlivých nástrojů pomocí Haighových diagramů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

GOROL, M. *Technology Analysis of Railway Wheel Forming: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2010, 73 p. Thesis head: Hrubý, J.

The master thesis is dealing with technology analysis of railway wheel forming. In the introduction is analyzed the total production technology of monoblock wheels. In the next part is created a mathematical model of operations upsetting, forming and rolling in the simulation software QForm. The mathematical model, which flows from the finite element method, was made on the basis of material test, drawing documentation and working conditions of forming. The working conditions was measured. From results of the simulation is analyzed simulated operations and assessed wear and life of forming tools. In final part was made estimation of tool life on the basis of Haigh diagrams.

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení, symbolů a zkratk	6
1 Úvod	8
2 Základní charakteristika železničních kol	9
3 Rozbor požadavků na železniční kola	11
4 Rozbor technologie výroby monobloku železničního kola	12
5 Metoda konečných prvků	22
6 Aplikace QForm	25
6.1 Materiál monobloku kola	28
6.2 Polotovar monobloku	31
6.3 Nástrojové materiály	31
6.4 Konstrukce tvářecích nástrojů.....	32
6.5 Základní technologické parametry procesu	34
6.6 Mazivo.....	35
6.7 Stroje použité pro výrobu monobloku	36
7 Výsledky simulace tvářecích operací	40
7.1 Operace přechování	40
7.2 Operace tvarování	42
7.3 Operace válcování.....	45
7.4 Časový režim operací tváření monobloku kola.....	48
8 Analýza opotřebení a životnosti komponent tvářecích nástrojů	49
8.1 Faktory ovlivňující opotřebení a životnost nástrojů	49
8.2 Vyhodnocení životnosti nástrojů pomocí aplikace QForm.....	50
8.3 Namáhání nástrojů	51
8.3.1 Operace přechování.....	51
8.3.2 Operace tvarování.....	53
8.3.3 Operace válcování	55
9 Odhad životnosti tvářecích nástrojů pro výrobu monobloku kola	61
9.1 Teoretický rozbor odhadu životnosti nástroje.....	61
9.2 Ukázka výpočtu odhadu životnosti zápusky pro operaci přechování	63
9.3 Odhad životnosti nástroje pro operaci tvarování	65
9.4 Odhad životnosti nástrojů pro operaci válcování.....	67
10 Diskuse dosažených výsledků	70
11 Závěr	72
12 Seznam použitých pramenů	73

Seznam použitého značení, symbolů a zkratk

Označení	Význam	Jednotka
A	tažnost	[%]
HB	tvrdost podle Brinella	–
HRC	tvrdost podle Rockwella	–
KU, KV	nárazová práce	[J]
N	počet cyklů	[1]
N_{∞}	10^7 cyklů	[1]
R_a	střední aritmetická úchylka profilu, výškový parametr drsnosti	[μm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
h_0	počáteční výška při jednoduchém přechování	[m]
h_1	konečná výška při jednoduchém přechování	[m]
k_c	koeficient bezpečnosti	[-]
m	konstanta pro výpočet meze únavy pro daný cyklus	[-]
q	měrné teplo	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
ε	konvenční deformace	[-]
λ	tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	hustota materiálu	[kg·m ⁻³]
σ	přetvárný odpor materiálu	[MPa]
σ_a, σ'_a	amplituda napětí	[MPa]
σ_c	časová mez únavy	[MPa]
σ_D	dovolené namáhání	[MPa]
σ_h	hydrostatické napětí	[MPa]
σ_m, σ'_m	střední napětí	[MPa]
σ_{\max}	maximální napětí	[MPa]
σ_{\min}	minimální napětí	[MPa]
σ_N	mez únavy pro daný cyklus	[MPa]
σ_p	mez pevnosti	[MPa]
σ_u	dovolená mez únavy	[MPa]
CAD	Computer Aided Design – počítačová podpora konstruování	–
CNC	Computer Numerical Control – číslicové řízení počítačem	–
CVD	Chemical Vapour Deposition – chemická metoda povlakování	–

Označení	Význam	Jednotka
ČSN	označení pro České státní normy	–
DIN	označení pro německé normy	–
EN	označení pro evropské normy	–
FEM	F inite E lement M ethod – metoda konečných prvků	–
MKP	metoda konečných prvků	–
PVD	P hysical V apour D eposition – fyzikální metoda povlakování	–
QDraft	Q uick D raft – grafický program určený k přípravě vstupních dat pro simulaci v aplikaci QForm 2D	–
QShape	Q uick S hape – grafický program určený k přípravě vstupních dat pro simulaci v aplikaci QForm 3D	–
QForm 2D/3D	Q uick Metal F orming Simulation – software pro simulace tváření, 2D/3D (two, three-dimensional) – dvojrozměrný, třírozměrný	–

1 Úvod

Železniční kola jsou vysoce namáhané součásti kolejových vozidel, na jejichž pevnostních a únavových charakteristikách závisí podstatnou měrou životnost a spolehlivost celé konstrukce. Kola musí snášet velké provozní zatížení při stále se zvětšující rychlosti vozidel na železnicích. Na tyto součásti jsou proto kladeny vysoké jakostní požadavky, které mají zajistit bezpečnost jejich provozu a optimální životnost. Jakost výrobku je prověřována řadou náročných zkoušek. V současnosti se vyvíjí kola s vysokou odolností proti tepelnému namáhání a s nízkou úrovní vnitřních zbytkových napětí i trvalých deformací, čímž se výrazně snižuje riziko poškození kola a také se prodlužuje doba pro jeho výměnu.

Výroba monobloků železničních kol tvářením za tepla, která probíhá na několika strojích, představuje velmi důležitou a náročnou technologii ve výrobě kolejových vozidel. Jedná se především o správnou volbu materiálu z hlediska jakosti a čistoty, mechanické a tepelné zpracování, dodržení předepsaných tolerancí, homogenity materiálu a v neposlední řadě správnost celého technologického postupu. Homogenita mechanických vlastností v objemu tvářeného výrobku patří k základním požadavkům při dimenzování dílů a součástí. Z technologického hlediska jsou nehomogenní mechanické vlastnosti v objemu tvářeného tělesa důsledkem nerovnoměrného vývoje mikrostruktury a nestability plastického toku materiálu. Technologie tváření musí proto probíhat tak, aby k těmto jevům docházelo jen minimálně.

Výroba monobloku železničního kola byla simulována v softwaru QForm 2D/3D (Quick Metal **F**orming Simulation) od firmy Quantor Ltd., který byl navržen pro rychlé simulace tváření. Program QForm vychází z metody konečných prvků (Finite Element Method, FEM). QForm dokáže například vyhodnotit rozložení efektivního napětí na jednotlivých částech nástroje, teplotní pole v celém výkovku nebo zachytit průběh tvářecí síly. Simulací je tak ověřena efektivnost zvoleného technologického postupu bez nákladného zkoušení v praxi.

Matematický model tvářecích operací vychází z materiálových zkoušek, výkresové dokumentace a provozních podmínek, které byly získány měřením v provozu. V práci jsou analyzovány tvářecí operace pěchování, tvarování a válcování použité při výrobě monobloku železničního kola. Na základě výsledků simulace bylo vyhodnoceno opotřebení a životnost komponent jednotlivých tvářecích nástrojů s cílem zvýšení jejich životnosti a snížení výrobních nákladů. Odhad životnosti nástrojů byl proveden pomocí Haighových diagramů.

2 Základní charakteristika železničních kol

Kola jsou nosným prvkem kolejového vozidla a umožňují jeho valivý pohyb po kolejích. Slouží k přenosu sil mezi vozidlem a kolejnicí a jsou nejvíce namáhanými částmi dvojkolí. Jejich návrhu, výrobě a diagnostice se věnuje velká pozornost, protože na jejich spolehlivosti závisí bezpečnost celého vozidla. V současné době rozeznáváme v zásadě dva druhy železničních kol:

- kola složená (obručová),
- kola celistvá (monobloky).

Celistvá kola jsou vyráběna kováním, lisováním a válcováním z jednoho kusu oceli. Převážně se vyrábějí z materiálu ER7. Základní požadavky na celistvá, kovaná a válcovaná kola s kaleným věncem, která jsou používána na evropských železničních sítích, stanoví norma ČSN EN 13262+A1. Tato norma definuje požadované vlastnosti kola, postup ověřování způsobilosti a dodací podmínky. Popis základních částí monobloku železničního kola je uveden na obr. 2.2.

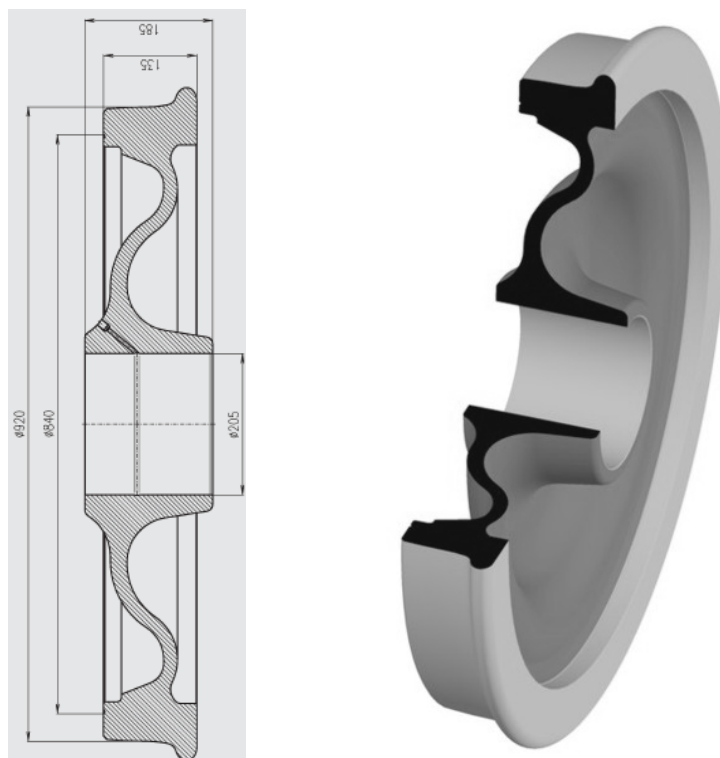
Kola obručová jsou složena z kotouče nebo hvězdice a obruče. Složená kola jsou používána na hnacích vozidlech. Hvězdice jsou vyráběny odléváním, kotouče mohou být tvářené nebo lité a obruče se stejně jako monobloky válcují. Opracované obruče se lisují na kotouče za tepla. Po nalisování je obruč zajištěna vzperným kroužkem.

Standardní celistvá kola pro nákladní vozy mají jmenovitý průměr 920 mm (obr. 2.1) a 1 000 mm. U hnacích vozidel normálního rozchodu se používají převážně kola o jmenovitém průměru 1 000 mm (motorové lokomotivy, motorové a elektrické vozy a jednotky) a 1 250 mm (elektrické lokomotivy) [12].

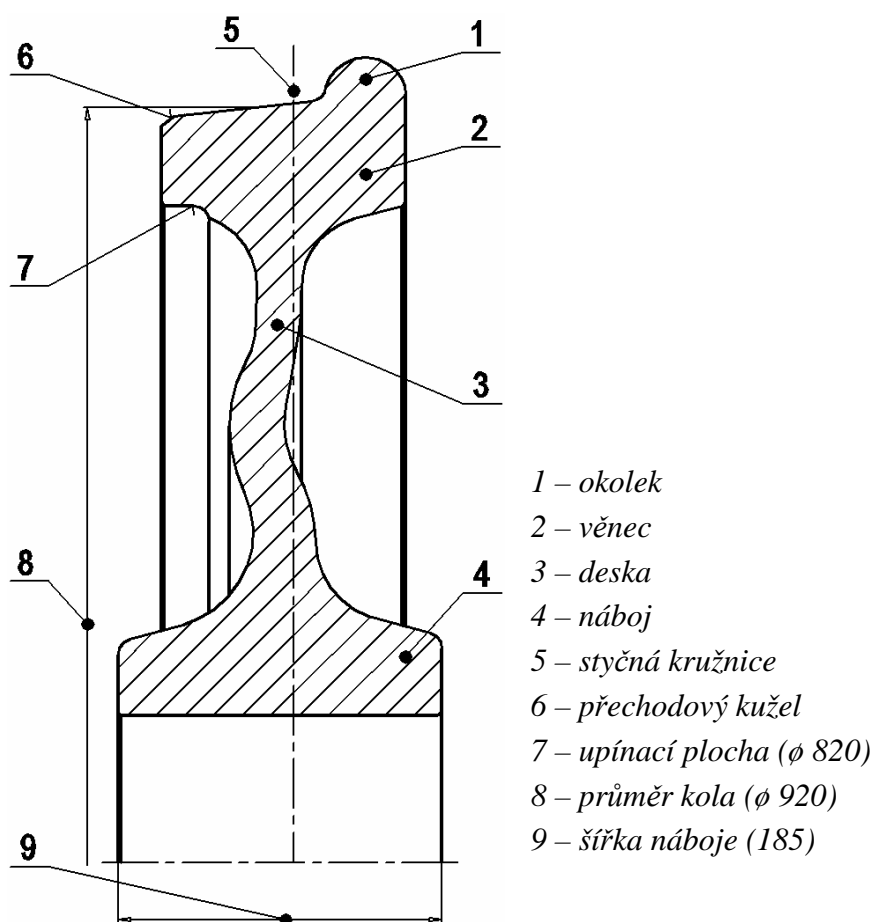
Tvar obvodu věnce kola, tj. jízdní plochy a okolku, je dán předepsaným jízdním obrysem. K věnci celistvého kola lze připevnit tlumič hluku a vibrací. V náboji kola je díra pro nalisování kola na nápravu. V náboji může mít kolo injekční otvor, který v díře vyústí v obvodovou rozváděcí drážku. Injekční otvor s rozváděcí drážkou usnadňují nalisování kola na nápravu, efektu se dosahuje napumpováním oleje vysokotlakou pumpou [12].

Charakteristika kola Bonatrans 29 [3]

- hmotnost od 312 kg pro kola \varnothing 920 mm,
- nápravové zatížení 25 t a více,
- jmenovitý průměr kola 813–920 mm,
- jakost oceli převážně ER7 s kaleným věncem dle EN 13262.



Obr. 2.1 Kolo Bonatrans 29 [3].



Obr. 2.2 Základní části monobloku železničního kola.

3 Rozbor požadavků na železniční kola

Po dobu svého provozu musí kolo splňovat soubor požadavků, které zajistí jeho stabilní jízdní vlastnosti a chování při daných provozních podmínkách. Kolo v tomto smyslu musí zaručit:

- a) kompatibilitu s kolejemi a s nápravou,
- b) minimalizaci deformací vlivem působících sil,
- c) zabránění poškození částí kola v důsledku brzdných sil,
- d) kompatibilitu se zamýšlenou hmotností na nápravu,
- e) zamezení selhání v důsledku únavy.

Nízké vnitřní pnutí kola snižuje nebezpečí vzniku a šíření trhlin, malé deformace zvyšují bezpečnost proti vykolejení vozidla v provozu, vysoká únosnost umožňuje velká nápravová zatížení a konečně vyšší odolnost proti opotřebení a tepelnému namáhání prodlužuje životnost kola do jeho výměny.

Dvojkolí přenáší tíhu vozu. Kolo se opírá o kolejnici na velmi malé ploše, protože jízdní plocha má úkos. Nákok slouží k vedení kola a v zatáčkách zachycuje odstředivou sílu. Na jízdní plochu působí u nákladních vagonů špalky brzd, při brzdění dochází k jejich otěru a vyvíjí se teplo. Jízdní plocha je tak namáhána otěrem a střídavým ohřevem a ochlazováním. Špalky brzd nesmí působit na nákok, jinak by brzy popraskal. Brzdění významně ovlivňuje opotřebení kol, nejmenší životnost mají kola u posunových lokomotiv, které nejvíce brzdí. Druhým významným faktorem je neustále se zvyšující rychlost na železnicích [5]. Kola pro vysoké provozní rychlosti (nad $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) jsou vystaveny vysokému namáhání, proto se minimalizuje rotující hmota a hledají se konstrukční řešení s nízkou hmotností kol.

Pevnostní vlastnosti kol jsou ověřovány numerickými simulacemi na počítači, dále pak laboratorními a provozními zkouškami. Celistvá kola se vyrábějí s různými tvarovými variantami desky. Cílem těchto úprav je co nejnižší hladina zbytkových pnutí. Přidají-li se k tomu i vyhovující parametry lomové houževnatosti materiálu, snižuje se nebezpečí vzniku a šíření trhlin ve věnci kola. Lepší únosnosti kola lze rovněž dosáhnout zpevněním povrchu desky kuličkováním, které se aplikuje u kol pro vysoké rychlosti [12].

4 Rozbor technologie výroby monobloku železničního kola

První kolejová vozidla se objevila již roku 1550 v Německu, významně se však začala kolejová doprava uplatňovat až v období průmyslové revoluce v Británii. Prvá kola byla dřevěná s obručí, poté se přešlo na celokovová kola. Nejdříve byla vyráběna odlévaná kola, pak kola složená z litého středu a tvářené obruče, následně se přešlo na tvářený disk i obruč a dnes jsou upřednostňována monobloková kola. Válcování železničních kol bylo vyvinuto počátkem 20. stol. ve Spojených státech. První patent na válcování monobloků kol získal Hendrick J. Loss (1903), jejich výroba se však rozšířila až po druhé světové válce. Dnes pracuje na celém světě 20 až 30 válcovaček na výrobu monobloků železničních kol. Nejmodernější a nejvýkonnější jsou dvě linky firmy Maanshan Steel v Číně, která ročně vyrobí 1,1 mil. kusů. U nás monobloky vyrábí firma BONATRANS GROUP a.s., jejíž technologie výroby je níže popsána [5].

Firma BONATRANS GROUP a.s. je předním českým výrobcem železničních kol a obručí v zemích Evropské unie. Výrobní program firmy zahrnuje jednak výrobu polotovarů kol, náprav, kotoučů a obručí ze surového materiálu, ale i jejich obrábění a montáž. Společnost vyrábí přes 300 typů surových kol a cca 200 typů obručí. Celý systém výroby je nastaven tak, aby umožňoval plynulou změnu sortimentu dle požadavků zákazníků. Technologie výroby monobloků kol je vzájemnou kombinací zápusťkového kování a válcování. Schéma celkového výrobního postupu monobloku železničního kola je uvedeno na obr. 4.12, schéma postupového tváření kola s jednotlivými rozměry zachycuje obr. 4.13.

Vstupním materiálem pro kola je kontinuálně litá vakuovaná ocel požadované jakosti, která je vyráběna ve 180 t konvertorech. Polotovar se nazývá kontislitek (obr. 4.1). Veškerý materiál je evidován a testován. Na jeho kvalitě závisí bezpečnost železniční dopravy.



Obr. 4.1 Kontislitky pro výrobu železničních kol [2].

Jednotlivé kontislitky jsou na přesných kotoučových pilách automaticky děleny na špalky o přesně stanovené hmotnosti dle typu vyráběného kola (obr. 4.2). Budoucí kolo tak vzniká s minimem odpadu.



Obr. 4.2 Dělení kontislitků na špalky pomocí kotoučových pil [2].

Vysoké požadavky jsou kladeny na ohřev špalků, což vyplývá především z nutnosti provést veškeré tvářecí operace v jednom ohřevu. Špalky jsou ohřívány v karuselové peci na požadovanou tvářecí teplotu 1280 °C (obr. 4.3). Karuselová pec je průchozí a pracovní prostor pece má část předehřívací, ohřívací a vyrovnávací. Spaliny jsou odváděny proti směru pohybu vsázky, takže ohříváný materiál je jimi předehříván. Kromě rovnoměrného prohřátí materiálu umožňují karuselové pece především reprodukovatelnost ohřevu každého polotovaru. Doba ohřevu je stanovena na 4,5–5 hodin, teplota v peci se pohybuje kolem 1330 °C. Celý proces ohřevu je řízen automatickým počítačovým systémem pro zajištění optimálního rovnoměrného ohřevu pro každou velikost špalku a druh materiálu. Ohřáté špalky se po ohřevu důkladně zbavují okují proudem vody o vysokém tlaku. Tímto procesem se zabrání případnému zatlačení okují do povrchu kol.



Obr. 4.3 Ohřev špalků na kovací teplotu v karuselové peci [2].

Operace pēchování a tvarování polotovaru jsou prováděny na hlavním kovacím lise. Jedná se o hydraulický lis DAVY 56 MN. Špalek je umístěn na pēchovací zápustku, kde se vystředí a pēchuje se za teplot 1120–1200 °C. Při pēchování se současně zeslabí střed polotovaru. Poté je pēchovaný polotovar přenesen do tvarovací zápustky. Vytvarováním je získán předkovek, který se vyznačuje finálním tvarem náboje, předkovanou dutinou v náboji a nejvhodnějším tvarem desky a věnce pro další tváření. Během pracovního cyklu se zároveň narušuje vrstva okují, které se ze zápustek vyfoukávají stlačeným vzduchem a po ukončení cyklu se zápustky chladí tlakovou vodou. Zápustky jsou mazány směsí grafitu, vazelíny a pilin. Po skončení obou operací je výkovek převezen dopravníkem k děrovacímu lisu.

Vystřížení díry v náboji předkovku se provádí na menším děrovacím lise DAVY 7,5 MN. Předkovek je sevřen mezi přidržovač a průstřižnici a zpětným pohybem proti průstřižníku je vyděrován. Kolo je poté přeneseno válečkovým dopravníkem na horizontální válcovací stolicí.

Na počítačově řízené válcovačce kol se systémem sedmi válců dojde k vytvarování desky a věnce kola do požadovaného rozměru (obr. 4.4). Válce jsou nastavitelné podle průměru vyráběných kol. Šikmé válce sevřou výkovek a jsou zapnuty otáčky válcovačky. Následuje několik otáček malou rychlostí za účelem dosednutí všech válců na výkovek. Válcování probíhá tak, že zpočátku působí šikmé válce na čelní plochy věnce a přemísťují postupně materiál z vnitřní strany věnce na jeho obvod. Tlačné válce společně s hlavním válcem tvarují jízdní profil věnce s okolkem. Při válcování tak dochází k zeslabení věnce, zvětšení jeho průměru, k utváření desky a k formování okolku. Válcování končí v okamžiku, kdy vnitřní průměr věnce dosáhne předepsaného rozměru. Šikmé válce jsou po celou dobu válcování ochlazovány vodními tryskami. Voda, která dopadá na desku kola, je vyfukována tlakovým vzduchem.



Obr. 4.4 Tváření desky a věnce kola na horizontální válcovačce kol [3].

Vyskytují se i technologické postupy, při nichž se náboj děruje až po válcování. Předkování tak probíhá pouze ve dvou operacích (pěchování a tvarování). Někteří výrobci používají také místo horizontálních válcovacích stolic vertikální válcovačky. Na obr. 4.5 je vertikální válcovačka používána americkou firmou Standard Steel.



Obr. 4.5 Vertikální válcovací stolice železničních kol [17].

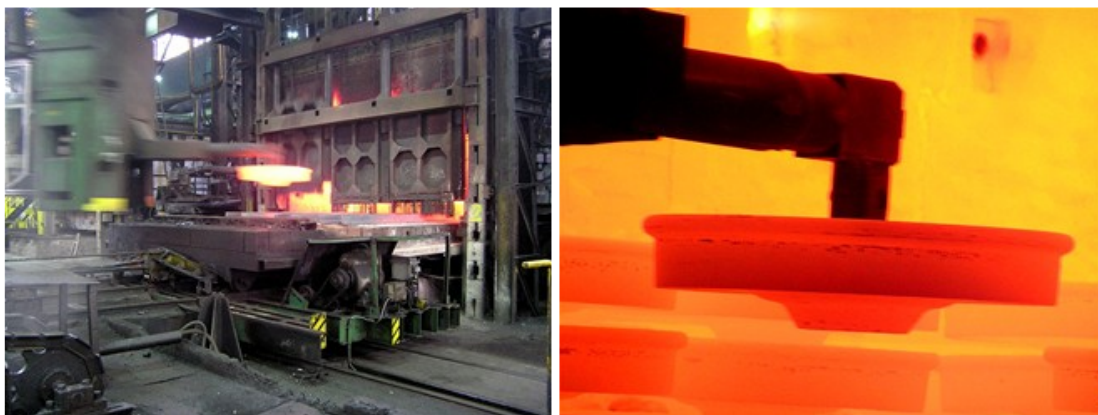
Nakonec se na prohýbacím lise DAVY 27 MN vytvaruje deska kola do požadovaného tvaru při zachování vnějšího průměru kola. Kolo se při této operaci současně kalibruje (obr. 4.6). Při ohřátí věnce kola a jeho roztahení za provozních podmínek by totiž jinak vznikala nežádoucí pnutí v místě přechodu desky do věnce a hrozilo by prasknutí materiálu. Prohnutí desky zajistí výhodný tvar kola pro jeho náročný provoz a zároveň zvýší životnost kola. Rovněž se provede ražení identifikačních znaků do čelní plochy věnce za tepla. Následuje kontrolní operace v podobě laserového proměření rozměrů kola v tomto teplém stavu.



Obr. 4.6 Prohnutí desky kola [3].

Požadované mechanické vlastnosti získá kolo řízeným procesem tepelného zpracování v tunelových pecích a na kalicích zařízeních. Celý proces je opět řízen počítačem. Kolo musí mít různé vlastnosti v různých místech, musí být pružné i tvrdé. Bohužel platí, že tvrdost je vykoupena snížením pružnosti. Proto se kalí pouze plocha kola, která se pohybuje po koleji. Věncí kola je v provozu postupně opotřebován a několikrát reprofilován. Jakmile dojde k jeho opotřeбенí na limitní hranici, musí se kolo vyměnit za nové. Standardní tloušťka materiálu na věnci kola pro opotřeбенí je kolem 30 mm. Tato tloušťka nám zaručí ujetí asi jednoho milionu kilometrů.

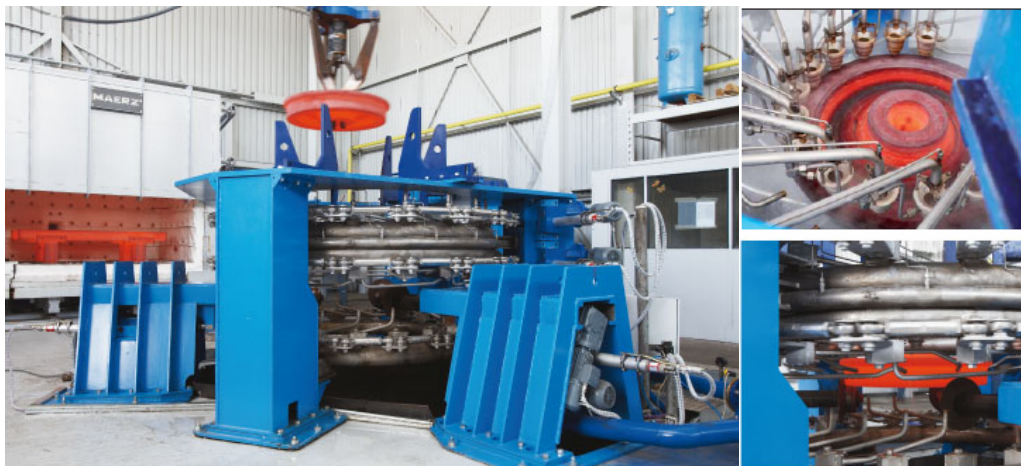
Nejprve se provede ohřev na kalicí teplotu cca 850 °C v tunelové peci (obr. 4.7). Poté se dá kolo manipulačním ramenem jeřábu na vlastní kalicí automat. Kalení provádí kalicí automat pouze po obvodu věnce kola (obr. 4.8). Kola jsou roztočena a věncí je ve vodorovné poloze automaticky sprchován. Moderní kalicí automat švýcarské firmy AFT zachycuje obr. 4.9. Po kalení následuje řízené ochlazování (popouštění) na teplotu kolem 500 °C v další tunelové peci. Celý proces zušlechťování kola trvá kolem devíti hodin. Po tepelném zpracování je na řadě tryskání kol ocelovými broky.



Obr. 4.7 Ohřev kola na kalicí teplotu v tunelové peci [2].



Obr. 4.8 Kalení obvodu věnce kola na kalicím automatu [3].



Obr. 4.9 Kalicí automat švýcarské firmy AFT [10].

Každé vyráběné kolo je během průchodu celou válcovací linkou jednoznačně identifikováno a lze zpětně dohledat přesná data o způsobu zpracování jednotlivých kol.

Následují mechanické a materiálové zkoušky. Na každém kole se provádí zkouška tvrdosti vnějšího čela věnce podle Brinella. Na jednom kole ze skupiny (max. 250 kol na výrobní dávku) se provádí chemický rozbor materiálu, zkouška tahem na tyčích odebraných z určených míst zkoušeného kola, zkouška vrubové houževnatosti na tyčích odebraných z věnce kola, zkouška tvrdosti v průřezu věnce, zkouška prokalitelnosti, zkouška makrostruktury a mikrostruktury, popř. kontrola vnitřního tlakového pnutí ve věnci kola [6].

Po těchto zkouškách jsou kola uvolněna pro další opracování. Linky pro obrábění kol a náprav splňují vysoké nároky na přesnost. Jedná se o dvě samostatné linky, které jsou vybaveny poloautomatickými obráběcími centry s CNC řízením. Obráběcí centra na obou linkách nejsou stejná, ale provádějí obdobné operace a je možné je pro většinu operací vzájemně nahradit. Pro obrábění kol pro nákladní dopravu se používá obráběcí centrum HEGENSCHIEDT se čtyřmi svislými soustruhy (karusely). Soustruhy pracují v páru, každá dvojice opracovává jedno kolo a to z vnější nebo z vnitřní strany. Kola se mezi soustruhy posouvají po dopravníku a výměna obrobku je prováděna samostatnými manipulátory (obr. 4.10). Síťové napojení na centrální databanku programů pro obrábění všech vyráběných typů kol umožňuje rychlé nastavení stroje. Vysoká přesnost obrábění u všech zařízení zajišťuje spolehlivé dodržení požadovaných rozměrů. V průběhu celého obrábění jsou výrobky identifikovány čárovými kódy, pomocí kterých jsou v počítačové síti zaznamenávány veškeré provedené operace včetně všech doprovodných informací.



Obr. 4.10 Manipulátor pro obrábění kol na CNC zařízeních [3].

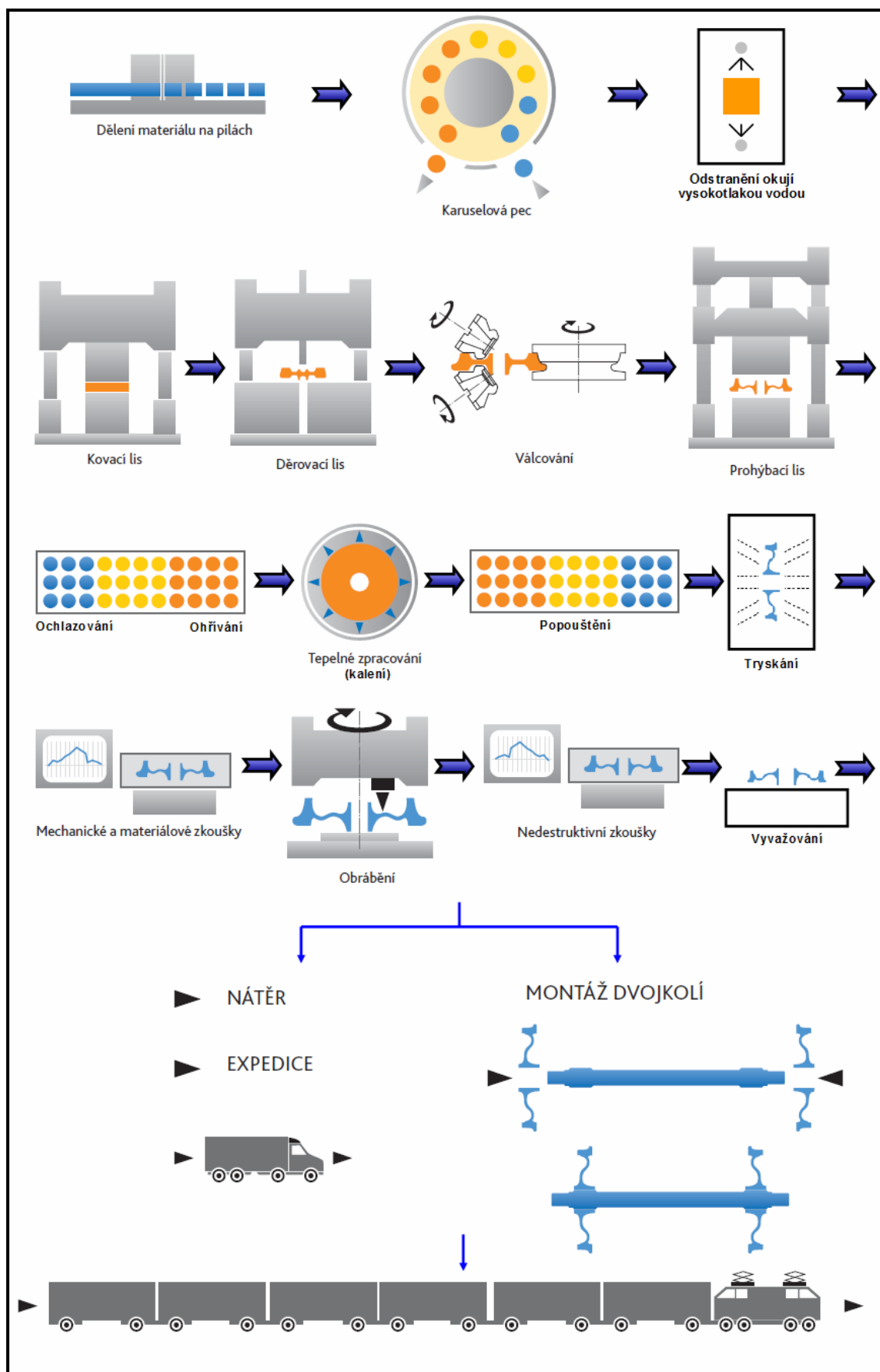
Po ukončení všech operací se kola podrobují nedestruktivním zkouškám, které zajišťují, že v dodaných výrobcích nejsou žádné povrchové či vnitřní vady. Každé kolo je podrobeno defektoskopické zkoušce věnce ultrazvukem a kontrole povrchu magnetickou metodou polévací.

Poté se kola vyvažují na vyvažovacích strojích (obr. 4.11). Vyvažování je možno provádět za klidu nebo při rotaci. Nevyváženost kol se projevuje vibracemi při jízdě kolejového vozidla.

Pokud jsou kola určena k montáži dvojkolí, pokračují dále do montážní linky, pokud mají být dodány jako samostatné díly, provádí se povrchová úprava dle podmínek dohodnutých se zákazníkem. Pro nanášení povrchových nátěrů slouží linka nátěrů kol a náprav. Na povrchu kol nesmějí být vidět žádné stopy po nástroji. Části, které zůstávají neopracované, musí být otryskané na hodnotu $Ra < 25 \mu m$, dokonale upravené a musí plynule přecházet do opracovaných ploch.



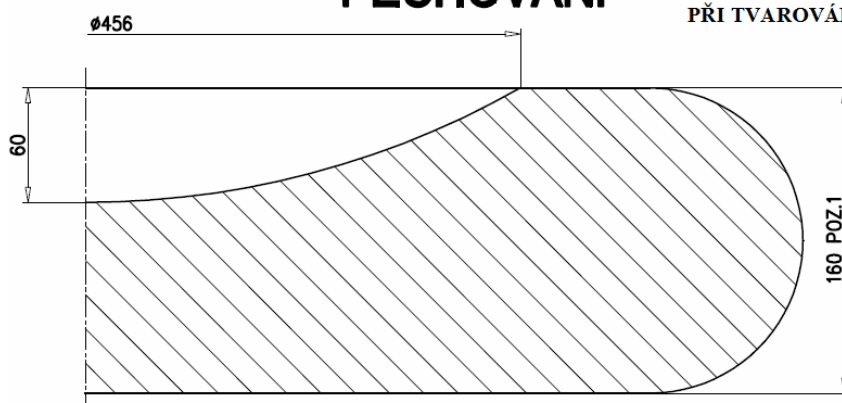
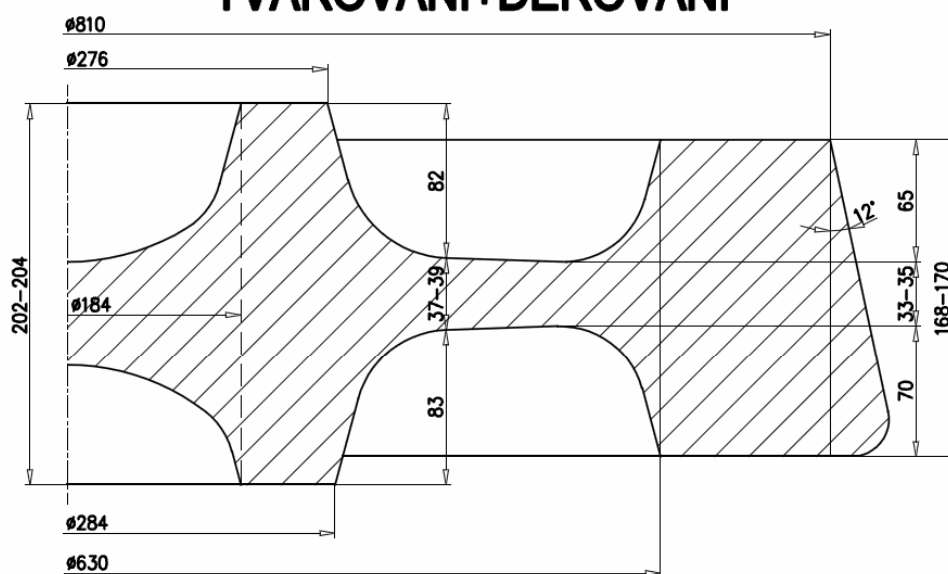
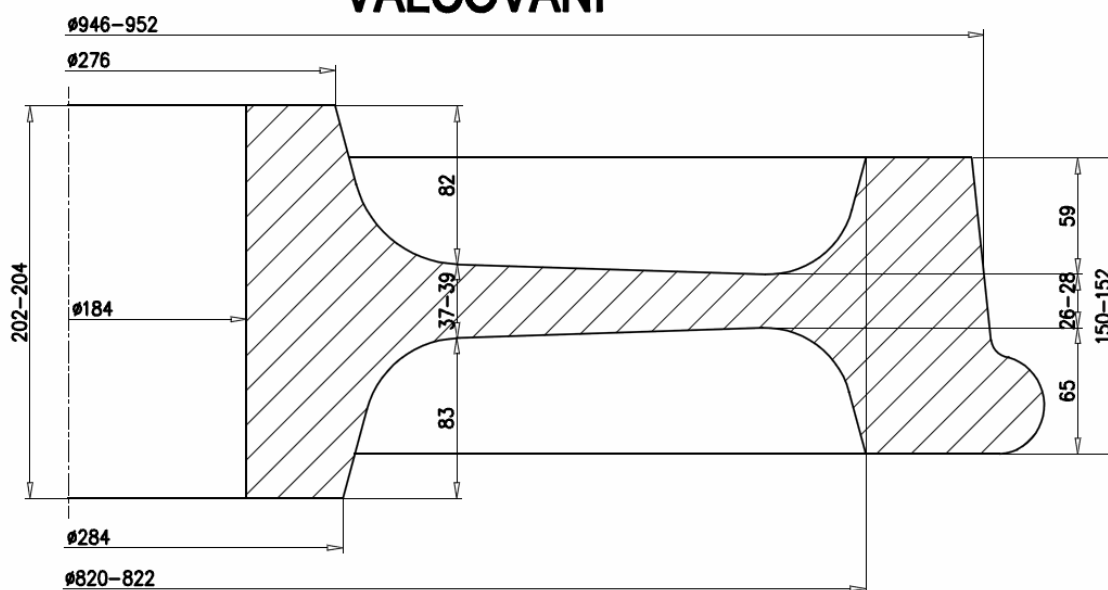
Obr. 4.11 Vyvažovací stolice pro vyvažování kol [3].



Obr. 4.12 Rozbor technologického postupu výroby monobloku železničního kola
[úprava 3].

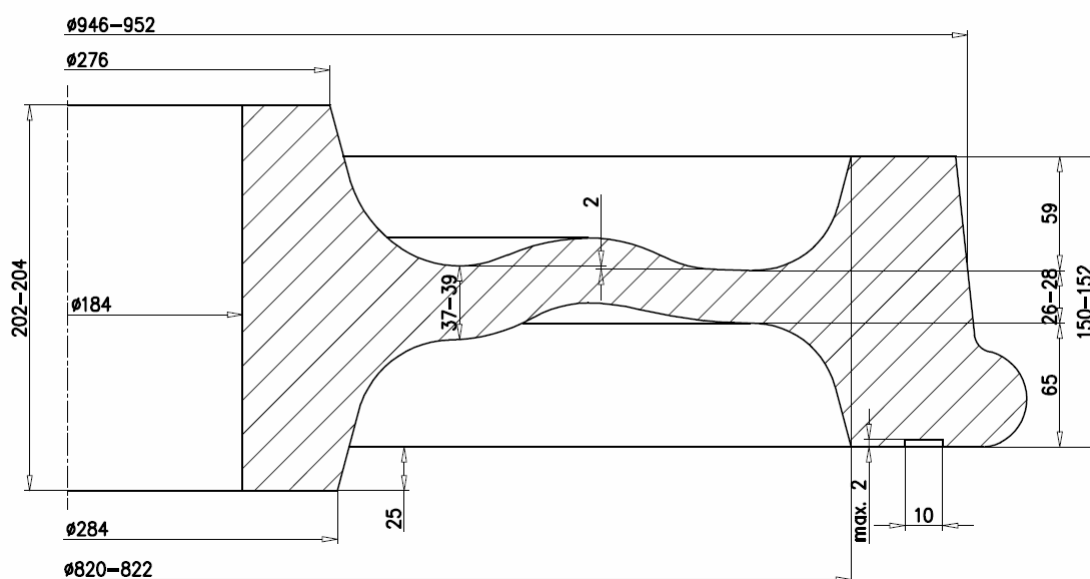
PĚCHOVÁNÍ

POZ. 1 – VÝŠKU NASTAVIT TAK, ABY BYL
ROVNOMĚRNĚ VYPLNĚN VĚNEC I NÁBOJ
PŘI TVAROVÁNÍ

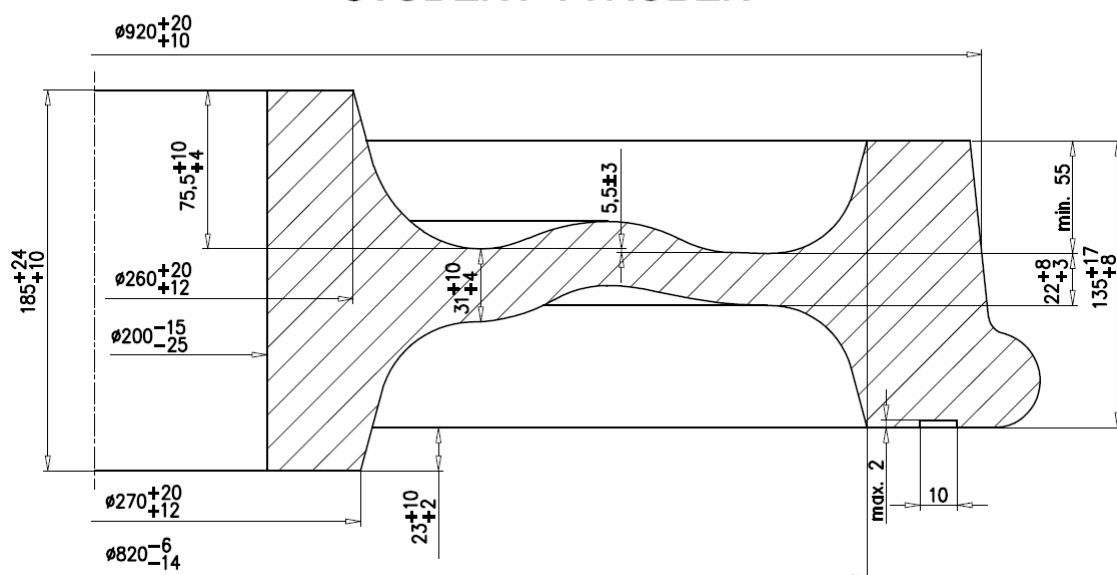
**TVAROVÁNÍ+DĚROVÁNÍ****VÁLCOVÁNÍ**

Obr. 4.13 Schéma postupového tváření železničního kola.

PROHÝBÁNÍ+ZNAČENÍ



STUDENÝ VÝROBEK



Obr. 4.13 (pokračování) Schéma postupového tváření železničního kola.

5 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP), nebo také podle anglického originálu Finite Element Method (FEM), je základem mnoha aplikací umožňující numerické simulace a našla uplatnění v mnoha vědních oborech jako je fyzika, statika, dynamika, elektrostatika, termomechanika atd.

Metoda konečných prvků je založena na řešení problémů soustavou lineárních rovnic. Sestavení rovnic a jejich řešení lze úspěšně provádět pomocí výpočetní techniky. Zpravidla je možné touto metodou řešit problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit [8].

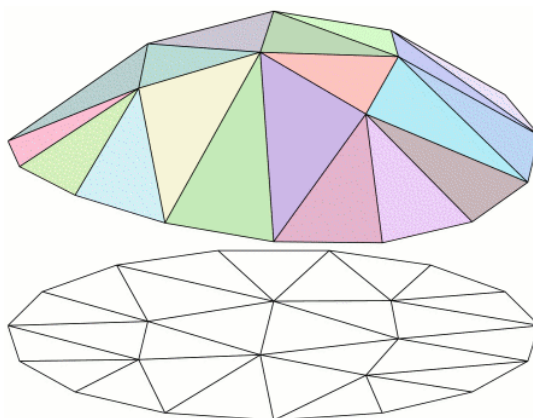
První pokusy aplikace MKP byly zaznamenány na počátku 20. století, kdy byla snaha nahradit těleso soustavou elastických prutů. Poprvé byla tato metoda popsána v roce 1941 (Courant), avšak absence vhodných prostředků, které by dokázaly řešit rozsáhlé soustavy rovnic, zbrzdila její další vývoj. Teprve v roce 1953, kdy byla rovnice tuhosti popsána v maticovém tvaru, mohla být k řešení problému metodou konečných prvků využita výpočetní technika [8]. Dnes existuje celá řada výpočetních systémů k řešení praktických tvářecích úloh, např. univerzální systémy MARC, ANSYS a speciální systémy QFORM, FORGE.

Základním principem MKP je diskretizace tělesa na malé části (prvky), které lze matematicky snadno popsat. Prvky můžeme mít rovinné či prostorové (obr. 5.1). V případě rovinného řešení úlohy se jedná o trojúhelníkové, případně čtyřúhelníkové prvky, prostorové řešení počítá například se čtyřstěny nebo kvádry. Volba prvku nemá jasná pravidla, přesnost výsledků závisí nejen na tvaru prvku, ale i na okrajových podmínkách a druhu analýzy. Většinou se vše řídí empiricky. Každý prvek má určitý počet uzlů, prostřednictvím těchto uzlů lze definovat zatížení nebo potlačení stupňů volnosti. Rozdělením tělesa na popsané prvky dostáváme tzv. síť. Hustota vytvořené sítě má vliv na kvalitu výsledků dosažených při výpočtu. Existují algoritmy pro automatické vytvoření sítí. Tyto algoritmy jsou schopné se adaptovat na nové skutečnosti, které vyvstanou během zkoumaného procesu. Obr. 5.2 zachycuje síť prvků operace tvarování pro vyhodnocení mechanického zatížení, teplotního pole a rozložení efektivní deformace. Na obrázku můžeme pozorovat rostoucí počet prvků sítě.

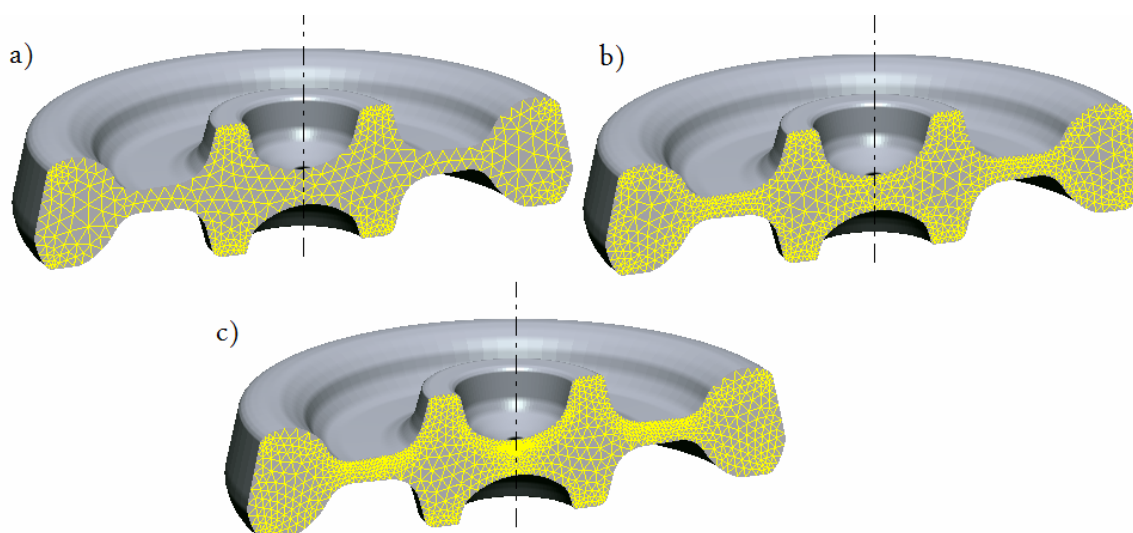
Fyzikální vlastnosti tělesa, posunutí, teplotu atd., které jsou charakteristické pro daný prvek, nahrazujeme funkcí prostorových souřadnic. Jedná se o tzv. aproximační funkci nebo také funkci tvaru (obr. 5.3). Funkce neznámé veličiny je nahrazena v jednotlivých uzlech aproximační funkcí, ta obsahuje právě tolik členů, kolik má prvek

uzlů. Pro čtyřúhelníkový prvek tak vznikne například polynom čtvrtého stupně. Obecně platí, že s rostoucím počtem uzlů prvku roste přesnost aproximační funkce a tedy i přesnost celého výpočtu [8].

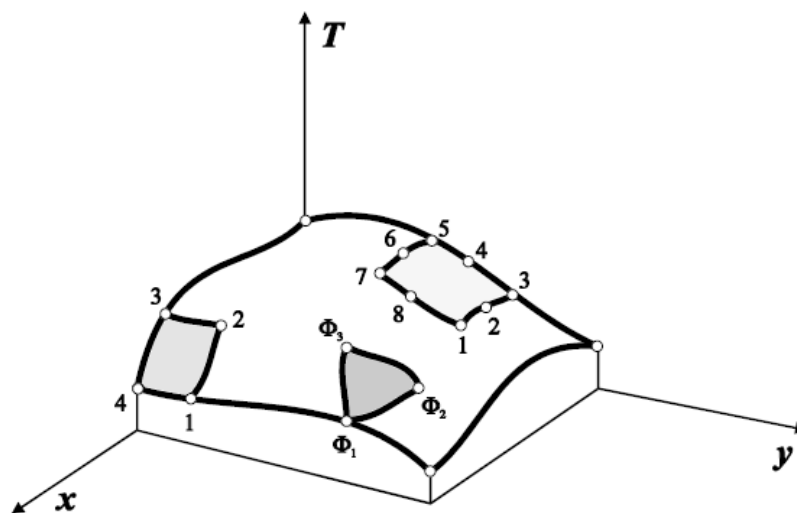
Mezi další základ MKP patří interpolace. Pomocí interpolace zjistíme přibližné hodnoty funkce $f(x)$ na daném intervalu $x \in (a, b)$ za pomoci známých hodnot této funkce v jiných bodech intervalu $\langle a, b \rangle$. Na obr. 5.4 je lineární interpolační pole, které lze s úspěchem použít při dostatečně velkém počtu prvků [8].



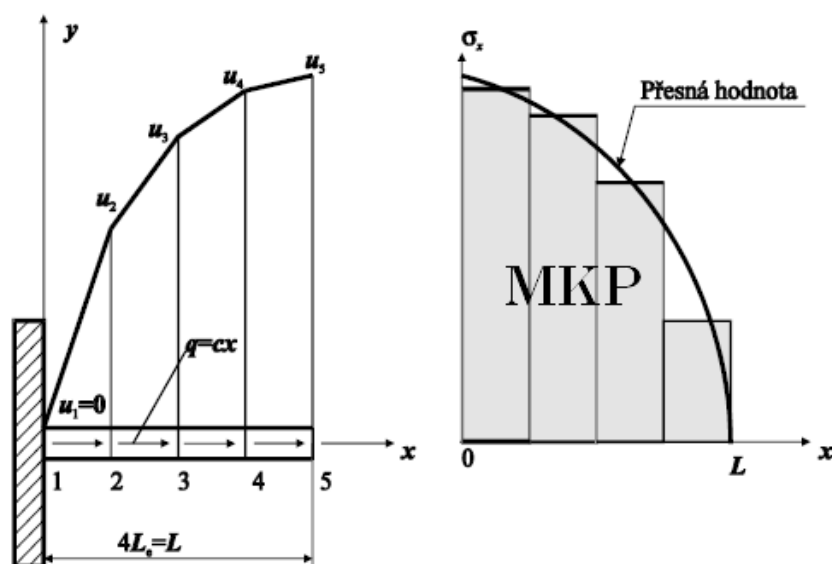
Obr. 5.1 Prostorové a plošné prvky.



Obr. 5.2 Síť prvků operace tvarování: a) síť mechanického zatížení (393 prvků), b) teplotní síť (691 prvků), c) síť efektivní deformace (1039 prvků).



Obr. 5.3 Rozložení funkce teploty na rovinné obdélníkové desce [8].



5.4 Lineární interpolační pole [8].

6 Aplikace QForm

Program QForm (obr. 6.2) pracuje s tuho-plastickým modelem materiálu s možností použití elastických nástrojů. Model tváření kovů realizovaný programem odpovídá reálnému procesu tváření, tj. měřítku jedna ku jedné. To znamená, že když uživatel specifikuje skutečná technologická data, poskytne mu simulace realistické a úplné informace o rozložení toku, teploty a deformace v materiálu, o síle, energii a dalších důležitých parametrech procesu tváření [4].

Výsledná simulace pomáhá vyhodnotit správnost volby polotovaru a kovacího stroje, optimalizovat tvar předkovku a nástrojů, zvolit vhodnou teplotu polotovaru, analyzovat vliv tření na materiál nástroje, zvolit správné mazivo a mnohé další.

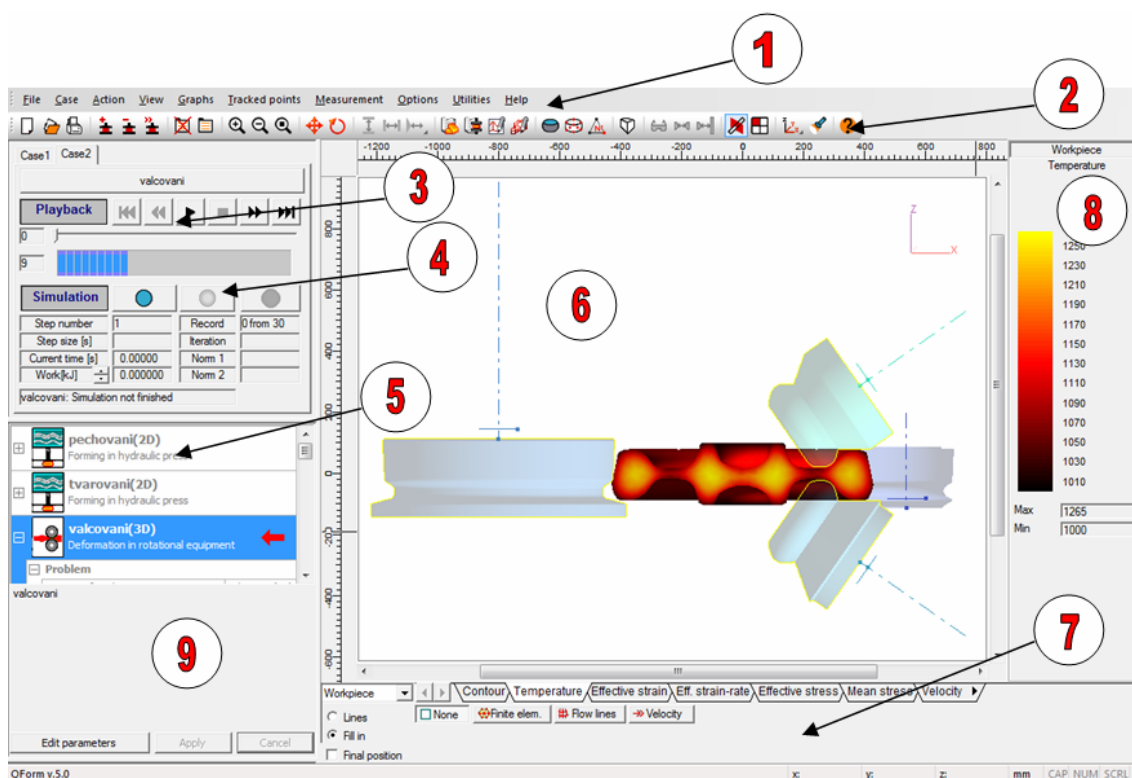
Vstupní data simulace jsou tvořena několika modely, jedná se o model technologický, materiálový, geometrický a model zatěžování, který dotváří celou simulaci. Vstupní data a parametry vyžadované aplikací QForm můžeme rozdělit do pěti základních skupin (viz obr. 6.1). Požadovaná data jsou uvedena v následujících kapitolách.



Obr. 6.1 Vstupní data pro simulaci v aplikaci QForm.

Mezi základní parametry procesu patří počáteční teplota polotovaru, doba přerušení mezi zdvihy, konečná vzdálenost mezi nástroji atd. Tyto parametry se zadávají v průvodci při zakládání příslušného projektu a jsou uvedeny v kapitole 6.5.

Operace přechování a tvarování byly řešeny jako 2D symetrické úlohy, operace válcování byla řešena jako 3D úloha, což umožnil nový modul aplikace QForm 5.0 pro válcování kroužků a kol.



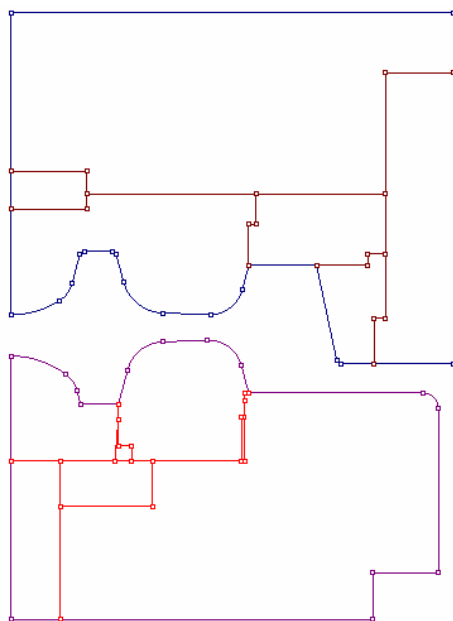
Obr. 6.2 Prostředí aplikace QForm 5.0.

Tab. 6.1 Popis hlavního okna aplikace QForm 5.0.

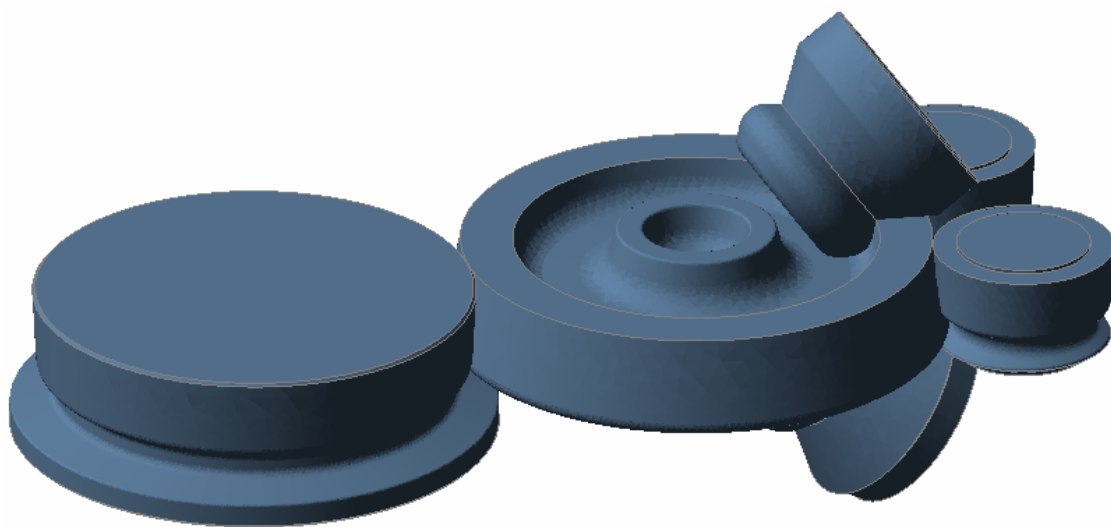
1	Nabídkový pruh	Obsahuje položky hlavní nabídky. Kliknutím na jednu z těchto položek se otevře seznam příkazů.
2	Hlavní panel nástrojů	Obsahuje běžné příkazy systému Windows a používané funkce QForm.
3	Panel pro řízení přehrávání	Umožňuje vybrat v souboru výsledků simulace příslušný záznam a přehrát jej.
4	Panel pro řízení simulace	Zastavení a spuštění procesu simulace.
5	Okno technologického řetězce	Umožňuje modifikovat vlastnosti operací.
6	Okno výsledků simulace	Slouží k vizualizaci výsledků simulace v polotovaru a v nástrojích.
7	Panel výsledků polotovaru nebo nástrojů	Umožňuje v závislosti na objektu (polotovaru, nástroj) přepínat mezi režimy vizualizace dějů.
8	Okno legendy	Obsahuje stupnici použitých barev s přiřazenými hodnotami dané veličiny.
9	Okno pro diagnostické zprávy	Hlášení diagnostických zpráv (chyby, uložení).

Geometrie jednotlivých nástrojů pro operace petchování a tvarování byla do systému QForm importována ve formě 2D objektu z CAD aplikace pomocí programu QDraft. Jednotlivé válce pro operaci válcování byly vytvořeny v softwaru Autodesk Inventor a do systému QForm byly importovány pomocí aplikace QShape. V této aplikaci byla každému válci přiřazena správná poloha tak, aby tvořily reálnou soustavu pro válcování

kol (obr. 6.4). QDraft (neboli **Quick Draft**) a QShape (neboli **Quick Shape**) jsou grafické editory určené k přípravě geometrického modelu pro simulaci. QDraft, který je určený pro zpracování 2D objektů, umožňuje vytváření obrysů nástroje a polotovaru a import geometrie vytvořené v CAD aplikacích. Ukázka importované geometrie nástroje s přiřazenými hladinami operace tvarování v editoru QDraft je na obr. 6.3. QShape je určený pro zpracování 3D objektů a umožňuje rovněž import objektů vytvořených v CAD aplikacích.



Obr. 6.3 Geometrie nástroje operace tvarování v editoru QDraft.



Obr. 6.4 Soustava válců pro operaci válcování vytvořená v editoru QShape.

6.1 Materiál monobloku kola

Jako materiál pro celistvá kola se používá kontinuálně litá, uklidněná, vakuovaná ocel, která se dodává ve formě kontislitků. Vakuování se pro tyto ocele předepisuje z důvodu snížení obsahu vodíku (vločky, křehnutí). Vodík přechází do oceli především z použitých surovin obsahujících vodu, z pecní atmosféry a při styku tekuté oceli s vlhkými žáruvzdornými materiály. Velké množství vodíku v oceli snižuje houževnatost, tažnost, kontrakci a často způsobuje křehké lomy materiálu. Kromě vakuování se do taveniny přidávají kovy vzácných zemin, které na sebe váží vodík a tvoří s ním hydridy. Ke snížení obsahu nekovových vměstků se provádí někdy mimopecní rafinace dmýcháním inertních plynů (např. argonu) do pánve [6]. Horní hranice obsahu uhlíku v oceli pro kola je 0,6 hmot. %, při nižším obsahu uhlíku by nastalo rychlejší opotřebení, při vyšším obsahu by se za provozu tvořily tepelné trhliny.

Pro výrobu daného monobloku kola, který je určen pro nákladní dopravu, se používá C-Mn ocel jakosti ER7 (R 7). Jedná se o modifikaci oceli ČSN 41 2050 vyráběné podle železniční normy. Ocel má však výrazně vyšší čistotu a nižší obsahy plynů, doprovodných a příměsových prvků. Chemické složení oceli v hmotnostních procentech dle normy EN 13262 je uvedeno v tab. 6.2.

Materiál monobloků kol musí splňovat několik základních požadavků jako je vysoká odolnost proti opotřebení a mechanické únavě, odolnost proti křehkému lomu a odolnost proti vzniku teplotních trhlin. Materiál kol má zásadní vliv na životnost, bezpečnost a tím i užitnou hodnotu pro zákazníka.

U celistvých kol se provádí obvodové zušlechťování jízdní plochy věnce, čímž se splní odlišné požadavky kladené na materiál věnce a desky kola. Dochází ke zvýšení pevnosti a odolnosti proti opotřebení jízdní plochy, aniž by se zvyšoval obsah uhlíku a tím nebezpečí vzniku tepelných trhlin v provozu. Mechanické vlastnosti obvodově zušlechťovaných kol závisí zejména na době kalení a teplotě popouštění. Jejich kombinací lze dosáhnout velkého rozdílu v pevnosti kol. Po ohřevu na kalicí teplotu (cca 850 °C) následuje odstupňované sprchování jízdní plochy tlakovou vodou po dobu 2–3 minut. Dále se kola popouštějí na teplotě 500 °C a poté se ochlazují na vzduchu.

Tab. 6.2 Chemické složení oceli ER7 v hmotnostních procentech [12].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]
0,52	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,06
Ni [%]	Cr+Mo+Ni [%]							
0,30	0,50							

Mechanické vlastnosti oceli ER7 [12]

Mez kluzu v tahu: $R_e = \text{min. } 520 \text{ MPa}$

Mez pevnosti v tahu: $R_m = 820\text{--}940 \text{ MPa}$

Tažnost: $A = 14 \%$

Požadované výrobní vlastnosti dle normy ČSN EN 13262+A1

Věncová část:

Mez kluzu: $R_{p0,2} = \text{min. } 520 \text{ MPa}$

Mez pevnosti v tahu: $R_m = 820\text{--}940 \text{ MPa}$

Tažnost: $A = 15 \%$

Nárazová práce při 20°C : KU5/300 = min. 12 J (průměr ze tří zkoušek min. 17 J)

Nárazová práce při -20°C : KV2/300 = min. 7 J (průměr ze tří zkoušek min. 10 J)

Tvrdost podle Brinella: 235 HBW5/750 (v hloubce 35 mm od jízdní plochy kola)

Desková část:

Mez pevnosti v tahu: R_m min. o 110 MPa nižší oproti R_m věncové části

Tažnost: $A = \text{min. } 16 \%$

Doporučené tepelné zpracování ekvivalentní oceli 12 050 [7]

Teplota kování: $800\text{--}1250^\circ\text{C}$

Normalizační žíhání: $830\text{--}860^\circ\text{C}$; ochlazování na volném vzduchu

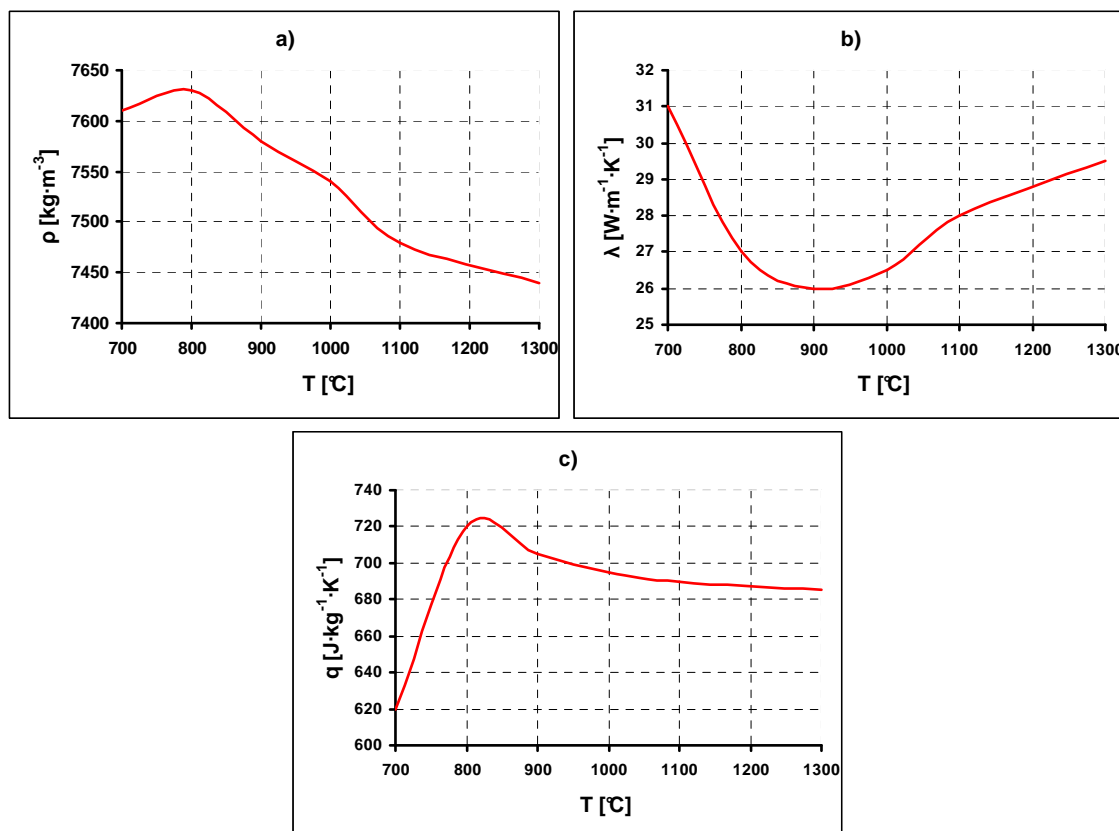
Kalení: $820\text{--}850^\circ\text{C}$ /voda; $830\text{--}860^\circ\text{C}$ /olej

Popouštění: $530\text{--}670^\circ\text{C}$; ochlazování na vzduchu

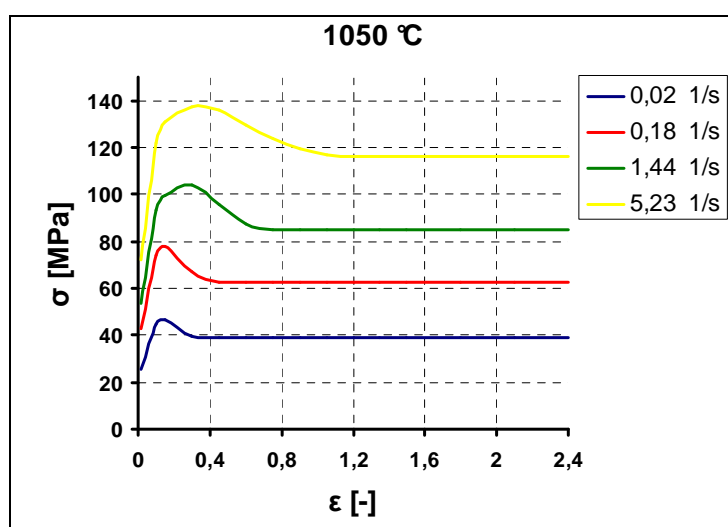
Konstitutivní model tvářené oceli ER7 byl zpracován na základě testů provedených na krutovém plastometru SETARAM, na pēchovacím plastometru GLEEBLE a na základě metalografických rozborů zkušebních vzorků zakalených v různých stádiích deformace. Data přirozeného přetvárného odporu jsou modelovány v rozsahu deformací $0,02\div 2,4 [-]$, rychlostí deformace $0,02\div 5,23 \text{ s}^{-1}$ a teplot $750\div 1300^\circ\text{C}$. Kromě konstitutivních závislostí jsou pro simulaci nutné další teplotně závislé veličiny. Simulace vyžaduje strukturu dat pro hustotu, tepelnou vodivost a měrné teplo. Tyto vlastnosti jsou modelovány v rozsahu teplot $700\div 1300^\circ\text{C}$ (obr. 6.5) [1].

Přetvárný odpor obecně závisí na třech parametrech, tj. na deformaci, rychlosti deformace a na teplotě. Přetvárný odpor může být závislý na *konvenční deformaci*, což je $(h_0 - h_1)/h_0$, nebo na *přirozené deformaci* $\ln(h_0/h_1)$, kde h_0 je počáteční výška a h_1 je konečná výška při jednoduchém pēchování. V některých případech je přetvárný odpor

funkcí dvou nebo dokonce jednoho z uvedených parametrů. Přetvárný odpor může být v databázi materiálů závislý na libovolné kombinaci argumentů. Maximální počet parametrů je omezen na tři. V databázi QForm můžeme ukládat data přetvárného odporu v tabulkové formě, použitím vzorce přetvárného odporu, případně může být přetvárný odpor vyjádřen jako řada křivek (obr. 6.6) [4].



Obr. 6.5 Závislost hustoty (a), tepelné vodivosti (b) a měrného tepla (c) na teplotě pro ocel ER7.



Obr. 6.6 Přetvárný odpor materiálu ER7 jako funkce konvenční deformace, rychlosti deformace a teploty.

6.2 Polotovar monobloku

Rozměr a tvar výchozího polotovaru je dán tvarem výkovku a jeho velikostí. Při volbě polotovarů nás zajímá jeho jakost, druh materiálu, hmotnost, rozměry s tolerancemi a v neposlední řadě stav povrchu. Hmotnost polotovaru, vedle jeho rozdělení dle osy výkovku, výrazně ovlivňuje tok materiálu při jednotlivých operacích. Můžeme tak ovlivnit průběh vláken a výsledné mechanické vlastnosti výkovku.

Tvar polotovaru navrhuje obvykle technolog dle vlastních zkušeností a je často omezen sortimentem dodávaného materiálů. Kované polotovary bývají nejčastěji tyče válcované za tepla čtvercového, obdélníkového nebo kruhového průřezu, dále ocelové bloky a sochory, případně polotovary vyrobené práškovou metalurgií a předlitky.

Jako polotovar pro výrobu monobloku je použit špalek o hmotnosti zhruba 487 kg (při hustotě oceli za studena $\rho = 7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), průměru 410 mm a výšce 470 mm. Polotovar byl volen s ohledem na míru zaplňování dutiny tvarovací zápustky. Špalky jsou řezány na kotoučových pilách z kontisliťků.

6.3 Nástrojové materiály

Na zápustkový materiál jsou kladeny vysoké požadavky. Mezi nejdůležitější vlastnosti ocelí pro zápustky patří vysoká pevnost za normálních i vyšších teplot, vysoká tvrdost a houževnatost, odolnost proti tepelným rázům, vysoká odolnost proti opotřebení otěrem, dobrá obrobitelnost, snadné tepelné zpracování, odolnost proti vzniku trhlinek při kalení a konečně přijatelná cena oceli.

Pro zápustky operací petchování a tvarování byl použit materiál ČSN 41 1800 (ekvivalent DIN St 70-2). Chemické složení oceli uvádí tab. 6.3. Jedná se o uhlíkovou konstrukční ocel. Používá se pro strojní součásti s vyššími požadavky na tvrdost a s velkou odolností proti opotřebení, například k výrobě kovaných koulí do mlecích mlýnů, tvarových pružin a destiček kloubových řetězů. Hodnota dovoleného namáhání σ_D v nástroji je 330 MPa (při 200 °C).

Tab. 6.3 Chemické složení oceli 11 800 v hmotnostních procentech [13].

C [%]	P [%]	S [%]
$\leq 0,75$	$\leq 0,055$	$\leq 0,050$

Pro válce operace válcování byl použit materiál ČSN 41 9663 (ekvivalent DIN 55NiCrMoV7, W. Nr. 1.2714). Jedná se o niklovou nástrojovou ocel pro práci za tepla.

Chemické složení oceli uvádí tab. 6.4. Nikl, který je hlavním legujícím prvkem, netvoří karbidy, ale rozpouští se v základním materiálu. Spolu s chromem zvyšuje prokalitelnost ocelí a zlepšuje jejich houževnatost. Karbidotvorné prvky wolfram, molybden a vanad zajišťují ocelím lepší odolnost proti otěru a proti poklesu pevnosti za vyšších teplot. Hodnota dovoleného namáhání σ_D v nástroji je 1250 MPa (při 200 °C).

Tab. 6.4 Chemické složení oceli 19 663 v hmotnostních procentech [7].

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Ni [%]
0,50–0,60	0,40–0,90	0,20–0,60	0,90–1,30	0,25–0,50	0,10–0,30	1,40–1,90

Doporučené tepelné zpracování oceli 19 663 [7]

Teplota kování: 850–1100 °C

Žíhání na měkko: 680–700 °C

Žíhání na odstranění pnutí: 650–680 °C

Kalení: 870–900 °C na vzduchu; 840–870 °C v oleji; minimální tvrdost po kalení 50

HRC; hloubka prokalení 150 mm

Popouštění: 500–650 °C; rozmezí tvrdosti 50–37 HRC

Nástroje považujeme v aplikaci QForm za pružně-plastická tělesa, která se trakcí dostanou do kontaktu s povrchem polotovaru a která jsou fixována odpovídajícími okrajovými podmínkami k povrchu podpory [4].

Parametry materiálů 11 800 a 19 663 uložené v databázi aplikace QForm jsou uvedeny v tab. 6.5.

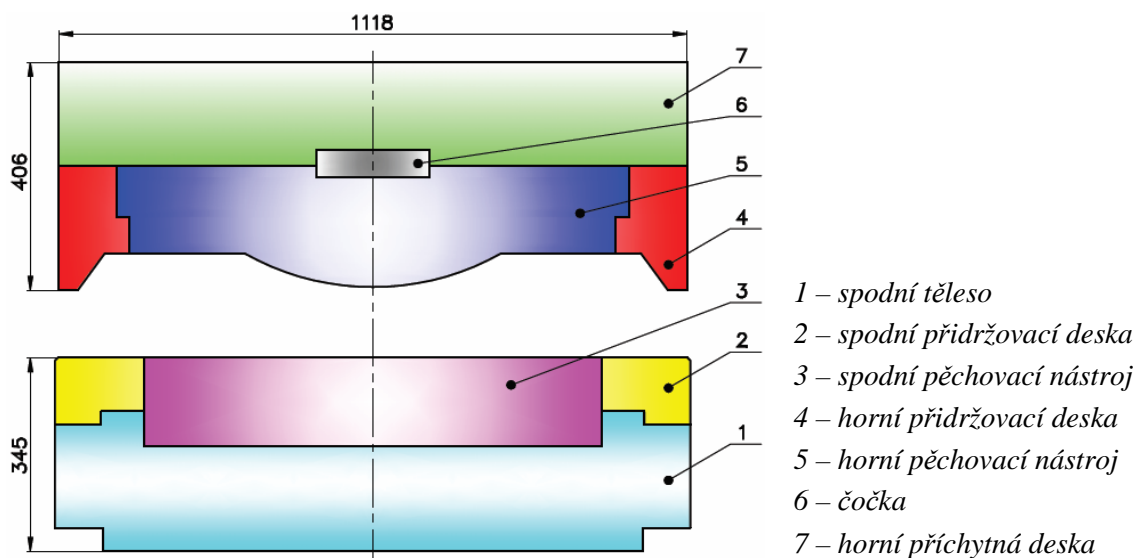
Tab. 6.5 Parametry nástrojových materiálů z databáze QForm.

Materiál	11 800	19 663
Youngův modul [MPa]	210 000	208 000
Poissonova konstanta [-]	0,3	0,3
Mez kluzu při 200 °C [MPa]	330	1250
Zpevnění [-]	0,02	0,028

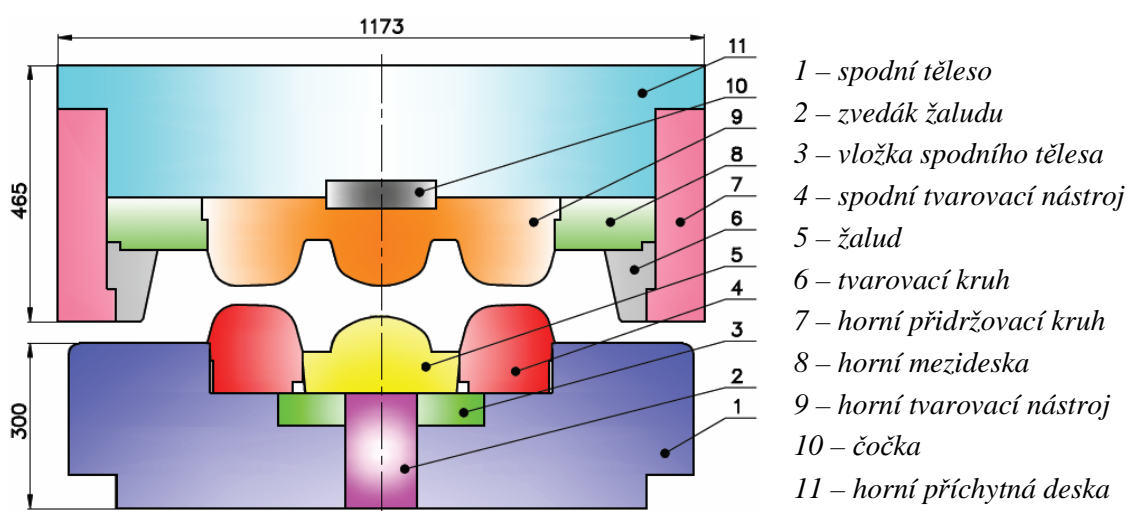
6.4 Konstrukce tvářecích nástrojů

Geometrie nástrojů pro jednotlivé operace tváření vychází z výkresové dokumentace. Sestavy nástrojů byly zjednodušeny a upraveny pro potřeby aplikace QForm. Sestava nástroje pro pěchování je uvedena na obr. 6.7, sestava nástroje pro tvarování na obr. 6.8.

Nástroj pro operace přechovávání a tvarování je dvoupolohový, kde přesun zápustek pro jednotlivé operace je mechanizován. Zápustky jsou složeny z více částí, což zajišťuje snadnou výměnu poškozených částí bez nákladné renovace celé zápustky. V dolním dílu zápustky operace tvarování slouží středový žalud jako vyrážec pro vyjmutí výkovku z nástroje. Aplikace QForm umožňuje analyzovat vícedílný nástroj tak, že je možné pro každý komponent určit jiný materiál a různé typy kontaktních podmínek mezi nimi.



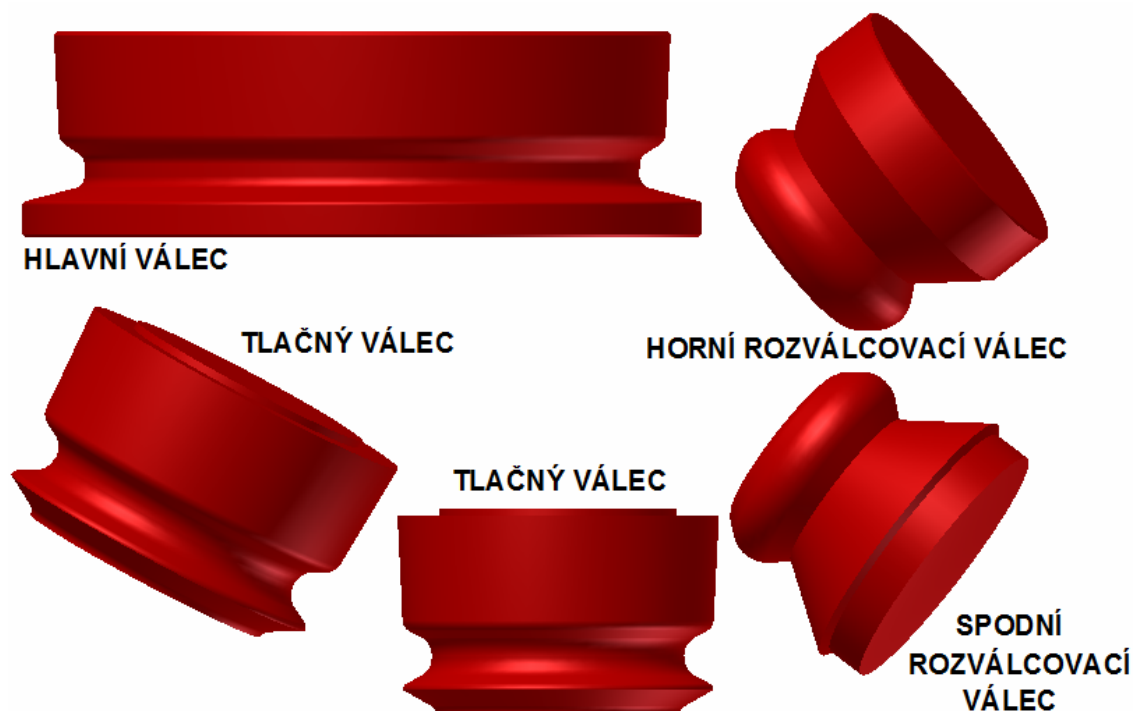
Obr. 6.7 Sestava nástroje pro operaci přechování.



Obr. 6.8 Sestava nástroje pro operaci tvarování.

Válcování železničního kola je ve skutečnosti zajištěno soustavou sedmi válců, pro zjednodušení a zkrácení výpočtu probíhá simulace jen s pěti válci. Vodící válce, které nebyly do válcovací sestavy zahrnuty, pouze válcované kolo podpírají a stabilizují

proces válcování. Tyto válce se nepodílí na přetváření materiálu. Modely jednotlivých válců operace válcování zachycuje obr. 6.9 a celková sestava válcování je na obr. 6.4.



Obr. 6.9 Modely jednotlivých válců pro operaci válcování.

6.5 Základní technologické parametry procesu

Program QForm vyžaduje definování technologických parametrů procesu. Technologický řetězec programu se skládá ze tří úseků, tj. chlazení polotovaru na vzduchu, chlazení v nástroji a tváření na daném stroji.

Simulace tváření polotovaru železničního kola zahrnuje tyto operace:

- ohřev špalku na kovací teplotu 1280 °C,
- pěchování a tvarování špalku na hydraulickém lise (DAVY 56 MN),
- válcování tvaru desky a věnce kola na horizontální válcovačce (DAVY, zjednodušená soustava 5 kol).

Operace děrování náboje předkovku na hydraulickém lise a prohýbání desky železničního kola na hydraulickém lise nebyly simulovány. Parametry procesu pěchování jsou uvedeny v tab. 6.6, parametry procesu tvarování v tab. 6.7 a parametry procesu válcování v tab. 6.8. Na povrchu nástrojů v operaci pěchování a tvarování je volena vyšší teplota s ohledem na nemožnost simulace akumulace tepla do nástroje.

Tab. 6.6 Parametry procesu pēchování.

Tvar polotovaru	ø 410–470
Počáteční teplota polotovaru	1280 °C
Chlazení na vzduchu	32 s
Chlazení v nástroji	26 s
Teplota nástroje	450 °C
Konečná vzdálenost polovin nástroje	160 mm
Teplota okolí	20 °C

Tab. 6.7 Parametry procesu tvarování.

Tvar polotovaru	předkovek
Chlazení na vzduchu	14 s
Chlazení v nástroji	9 s
Teplota nástroje	450 °C
Konečná vzdálenost polovin nástroje	33 mm
Teplota okolí	20 °C

Tab. 6.8 Parametry procesu válcování.

Tvar polotovaru	předkovek
Chlazení na vzduchu	92 s
Chlazení v nástroji	13,1 s
Teplota nástrojů	250 °C
Teplota okolí	20 °C

6.6 Mazivo

Maziva mají při tváření materiálů především snížit tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem a snížit otěr nástroje, což vede k prodloužení jeho životnosti. Snížením tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem se sníží deformační odpor, síla a energie potřebná pro danou tvářecí operaci. Mezi třením a otěrem povrchu nástroje není žádná zákonitost, a proto se při snížení tření může otěr i zvýšit. Důležitý je rovněž chladicí účinek a tepelná izolace maziva. Mazivo snižuje teplotu nástroje buď přímým ochlazením, nebo svými tepelně-izolačními vlastnostmi, kdy souvislá vrstva mazadla brzdí přechod tepla z tvářeného materiálu do nástroje. Zároveň chladicí účinek maziva ovlivňuje tok kovu a zabraňuje nalepování kovu na nástroj.

Mazivo se nesmí rozkládat vlivem provozních teplot a tlaků a musí si podržet v širokém tepelném rozmezí malou a stálou viskozitu. Zůstanou-li například během kování v dutině záпустky tuhé zbytky maziva, mohou zabránit dokování nebo se zakovou do výkovku [7].

Jako mazivo je v operaci pēchování a tvarování použit grafit s vazelínou a vodou. Jedná se o tuhé mazivo dispergované v kapalině, která se na povrchu teplého nástroje odpaří a vytvoří se tak suchý souvislý mazací film tuhého maziva. Grafit má dobré mazací vlastnosti, které se připisují jeho krystalické struktuře a mimořádné přilnavosti. Dokáže vniknout do relativně pórovitého povrchu kovů, čímž se dosáhne velmi těsného spojení s kovem. Výhodou grafitového filmu je i velká termická stabilita. V normální atmosféře je chemicky pasivní do teplot 600 °C, ve vakuu nebo inertní atmosféře až do teplot 1000 °C. Laboratorní testy i provozní zkoušky prokázaly, že výtečné vlastnosti grafitu jsou dosaženy zejména v případech, kdy je nanášen rozprašováním. Kvalita rozprašování a použití aditiv se výrazně podílí na celkové účinnosti maziva.

Parametry použitého maziva potřebné pro aplikaci QForm jsou uvedeny v tabulce 6.9. V operaci pēchování a tvarování byly použity pro dolní a horní poloviny nástrojů jiné parametry maziva. Operace válcování vykazovala značný prokluz válců, tudíž musela být použita varianta bez maziva.

Efektivní koeficient přenosu tepla se používá tehdy, když se nástroje považují za plná tělesa s jednotnou průměrnou teplotou. Tento přístup pomáhá obejít simulaci teplotního rozložení v nástrojích, přičemž je dodržena dobrá přesnost výsledků [4].

Tab. 6.9 Parametry použitého maziva z databáze QForm.

Označení v databázi QForm	Operace	Složení	Třecí faktor [-]	Efektivní koeficient přenosu tepla [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Skutečný koeficient přenosu tepla [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
a16901	tvarování	grafit–voda–vazelína	0,1	169	169
a16902	pēchování tvarování	grafit–voda–vazelína	0,2	169	169
a1350wmk	pēchování	grafit–voda–vazelína	0,6	1350	13 500
no-st-h-1	válcování	bez maziva	1,0	5000	50 000

6.7 Stroje použité pro výrobu monobloku

Pēchování a tvarování polotovaru železničního kola je provedeno na hydraulickém lisu DAVY 56 MN. Hydraulické lisy pracují statickým tlakem, k překonání deformačního odporu se využívá potenciální energie, která se získá pomocí vysokotlaké kapaliny. Činnost hydraulického lisu vychází z Pascalova zákona. Rovněž se využívá skutečnosti, že hydraulická kapalina je nestlačitelná a je schopná přenášet tlak.

Válcování tvaru desky a věnce kola je zajištěno na horizontální válcovací stolici DAVY, přičemž z původních sedmi válců byly odebrány dva vodící válce a simulace

probíhá pouze s pěti válci. Vodící válce jsou na straně hlavního válce, válcované kolo podpírají a společně s hlavním válcem stabilizují samotný proces válcování. Parametry strojů z databáze QForm jsou uvedeny v tab. 6.10 a v tab. 6.11.

Tab. 6.10 Základní technické parametry hydraulického lisu z databáze QForm.

Stroj	Nominální rychlost [mm·s⁻¹]	Maximální síla [MN]
DAVY 56 MN	75	56

Operace válcování proběhne ve skutečnosti za 20 otáček kola, celkový čas operace je 33 s. Pro náročnost výpočtu a omezené možnosti aplikace QForm byl simulován jen počátek válcování, kdy jsou válce nejvíce zatíženy. V počáteční fázi válcování dochází k největšímu přetvoření materiálu, zatěžující síla s rostoucím časem stoupá a postupně se ustaluje na maximální hodnotě. Tento výpočet plně postačuje pro následný rozbor životnosti jednotlivých válců (viz kap. 8.3.3).

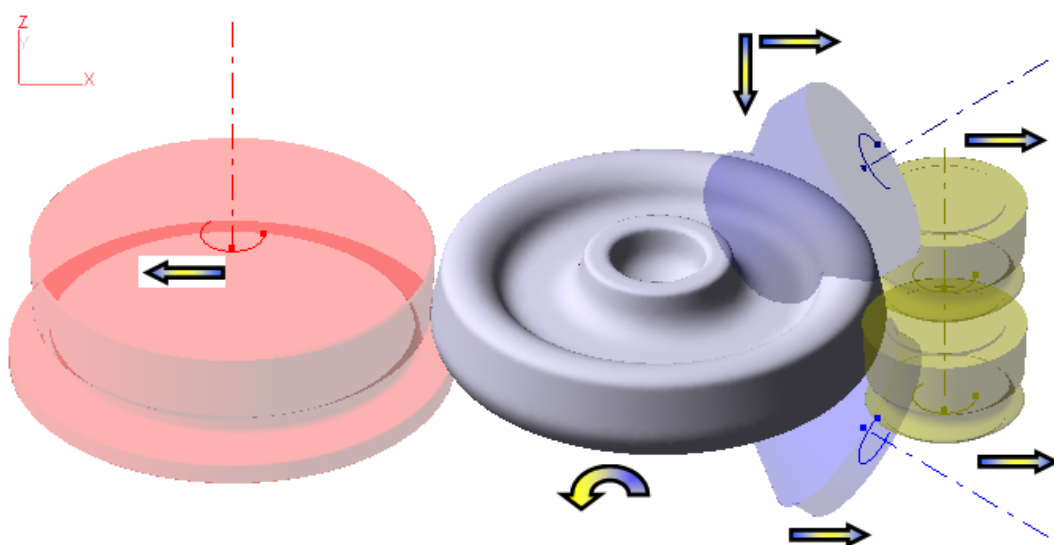
Rychlost otáčení kola se pohybuje mezi 50 až 60 otáčkami za minutu. V simulaci bylo počítáno s 60 otáčkami za minutu. V reálném procesu jsou rozválcovací (šikmé) válce a hlavní válec poháněné, přítlačné válce mají nucený pohyb. Simulovaný pohyb byl zjednodušen, všechny válce jsou poháněné. Válce vykonávají vedle rotačního pohybu i pohyb posuvný. Šikmým válcům a hlavnímu válci byla přidělena posuvová rychlost, tlačné válce mají nulovou posuvovou rychlost a jejich pohyb je zajištěn odtlačováním pomocí válcovaného kola (viz tab. 6.11). Pracovní pohyby jednotlivých válců soustavy jsou zachyceny na obr. 6.10 a obr. 6.11, směr rotace a posuvů válců ukazují jednotlivé šipky. Horní šikmý válec vykonává posuvný pohyb ve dvou směrech, protože se musí vedle zvětšujícího se průměru věnce redukovat i tloušťka věnce a desky. Průměr kola se zvětší o 101 mm, tloušťka věnce se zmenší zhruba o 18 mm a tloušťka desky se zmenší o 7 mm. Změnu rozměrů zachycuje obr. 6.12, přítlačný válec je pro názornost kreslen v rovině os šikmých válců. Spodní šikmý válec vykonává stejně jako ostatní válce posuvný pohyb jen v jednom směru a oproti hornímu válci má opačný smysl rotace.

Reálné hodnoty jednotlivých posuvů a otáček válců nebyly k dispozici a jejich nastavení způsobovalo řadu problémů. Hodnoty počtu otáček válců za minutu byly vypočítány z rovnosti obvodových rychlostí válcovaného kola a příslušného válce. Na obr. 6.11 je uvedeno kinematické schéma pro počátek válcování. Otáčky a obvodové rychlosti válců byly počítány pro kontaktní průměr kola s válci, pro tlačné válce v počátku válcování a pro ostatní válce v závěru válcování. Šikmým válcům byly

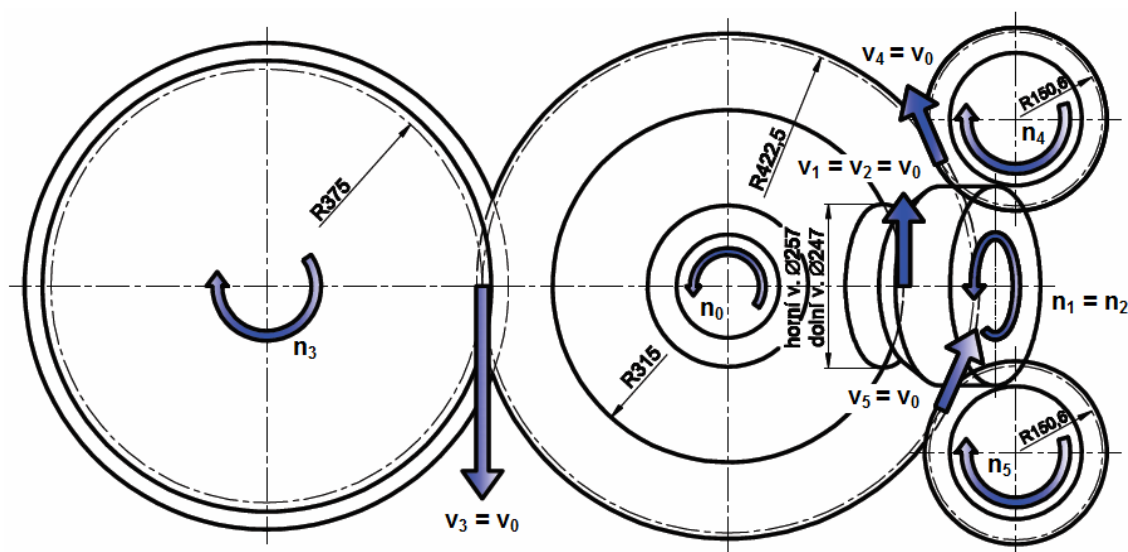
přiděleny stejné otáčky. Aplikace QForm neumožnila nastavit časovou proměnlivost otáček, resp. obvodových rychlostí válců během válcování. Obvodové a posuvové rychlosti v závislosti na čase mají v simulaci lineární charakter.

Tab. 6.11 Parametry horizontální válcovací stolice z databáze QForm.

Válec	Posuvová rychlost [mm·s ⁻¹]	Otáčky [min ⁻¹]
Hlavní	5,4	76,24
Horní rozválnovací	1,47	134,91
Spodní rozválnovací	1,35	134,91
Přítlačné	0	168,33

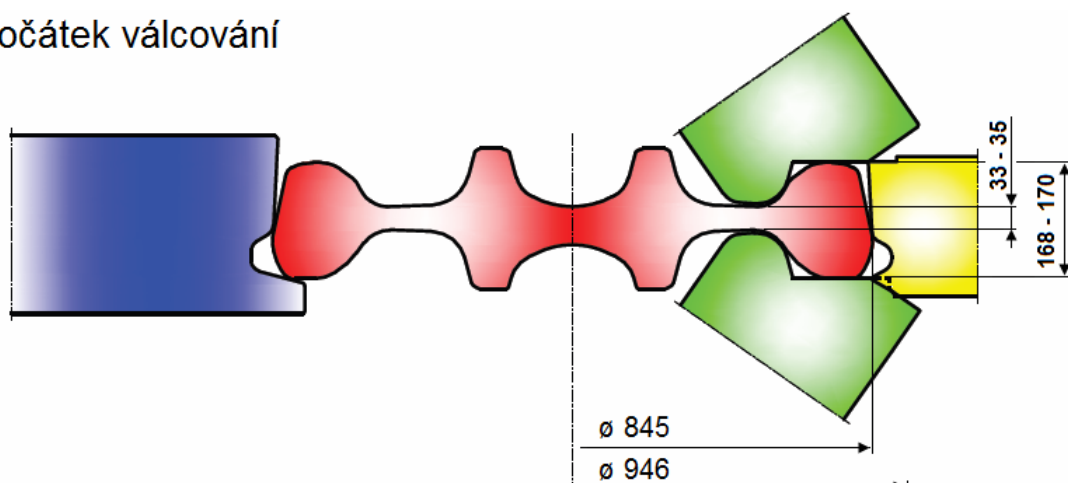


Obr. 6.10 Pracovní pohyby soustavy válců.

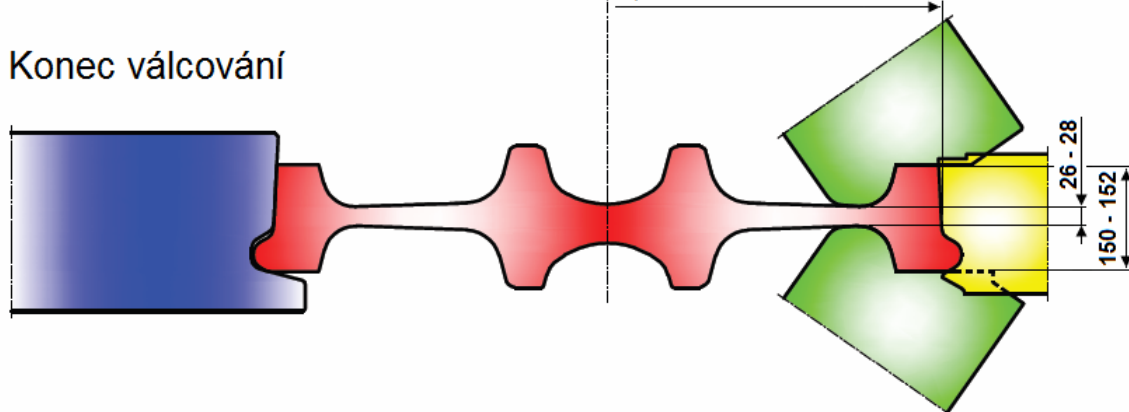


Obr. 6.11 Schéma pro výpočet otáček a obvodových rychlostí válců (počátek válcování).

Počátek válcování



Konec válcování



Obr. 6.12 Utváření desky a věnce kola válcováním.

7 Výsledky simulace tvářecích operací

7.1 Operace pēchování

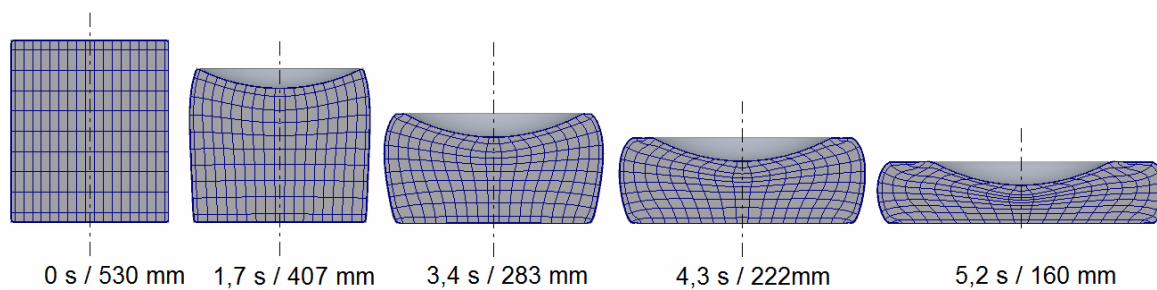
Polotovár o průměru 410 mm a délce 470 mm, který se pēchuje na výšku 160 mm, má na vstupu do analýzy teplotu 1280 °C. Změna tvaru polotovaru není komplikovaná, jedná se o klasické pēchování. Prostřednictvím velikosti vnitřního kulového zahloubení lze kontrolovat rozdělení toku materiálu v desce kola v následující operaci tvarování směrem do náboje a hlavy. Výška pēchování určuje okamžik zaplnění náboje kola a zastavení zdvihu v operaci tvarování. Výška se proto musí nastavit tak, aby byl rovnoměrně vyplněn věnec i náboj [1]. Jako ideální se ukázala výška 160 mm, což zachycuje závěrečná fáze pēchování na obr. 7.1. Průměr předkovku na konci operace dosahuje zhruba 745 mm.

Čistý čas operace pēchování je 5,2 s. Maximální kovací síla procesu pēchování monobloku kola je 15,5 MN. Linie toku v podélném a příčném směru zachycují na obr. 7.1 postupné tečení materiálu v příslušném čase a poloze horní poloviny nástroje. Pracovní diagram operace je uveden na obr. 7.2, diagram má hladký průběh klasického pēchování.

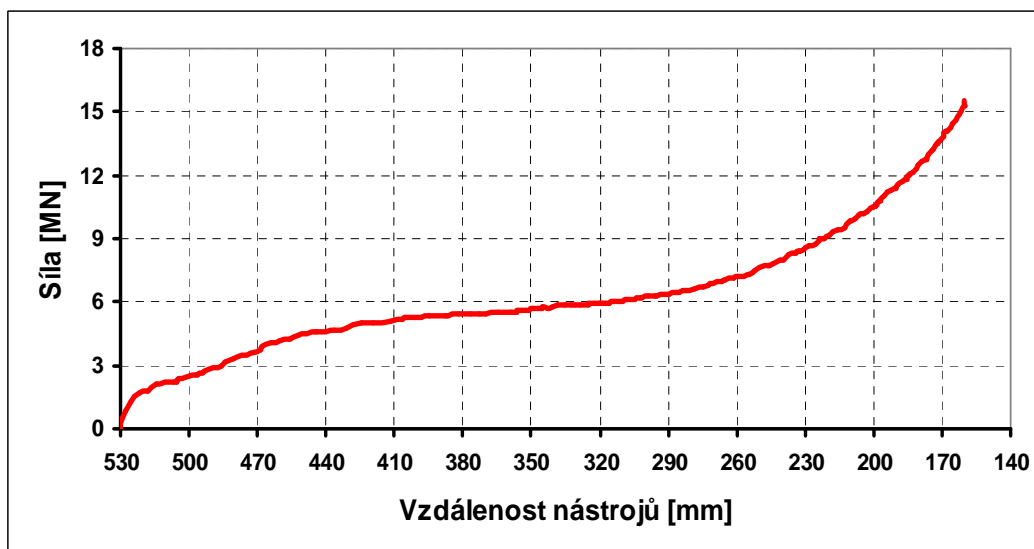
Teplota na počátku operace poklesne v povrchových vrstvách špalku v důsledku odstranění okují, ochlazení na vzduchu a setrvaní určitou dobu ve styku se zápusťou (obr. 7.3). Během operace pak dojde vlivem styku materiálu s funkčními plochami nástroje k dalšímu ochlazení povrchových vrstev až na teplotu cca 1050 °C. Při následující prodlevě mimo nástroj (23 s) nastane jejich částečné opětovné prohřátí od teplého jádra polotovaru, které si zachovává původní teplotu ohřevu (obr. 7.9). Lze tedy předpokládat, že během této prodlevy dojde k úplné rekrytalizaci polotovaru.

Intenzita deformace představuje výsledný deformační účinek intenzity napětí. Charakterizuje velikost a průběh změny tvaru plasticky tvářeného materiálu ve zvoleném bodě tělesa [9]. V operaci pēchování dosahuje intenzita deformace průměrných hodnot 1,0–1,8 [-], špičkově 2,1 [-] ve vrstvách pod kulovým zahloubením (obr. 7.5).

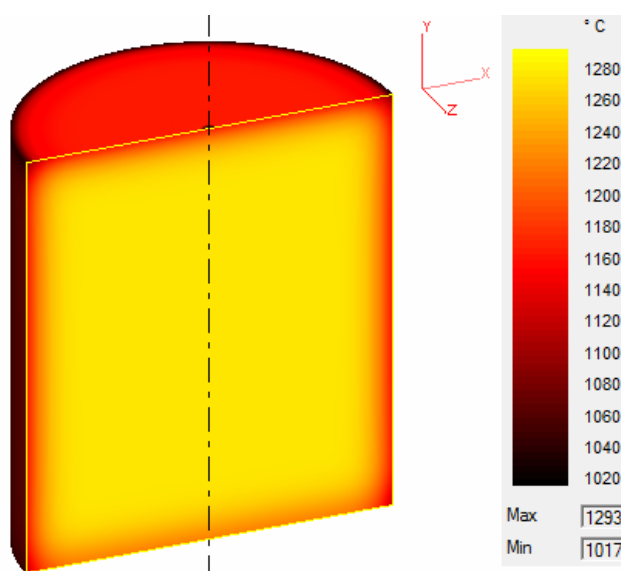
Na obr. 7.6 je zobrazeno rozložení středního hlavního napětí (někdy hydrostatické napětí σ_h) pēchovaného špalku. Hodnoty napětí rostou od osy směrem k vnější soudečkovité ploše válce. Na ose působí tlakové napětí o velikosti cca -60 MPa a na soudečkovité ploše dosahuje tahové napětí maximální hodnoty kolem 16 MPa. Výjimkou je jen vnější hrana předkovku, kde působí tlakové napětí -95 MPa (modrý pás). Zvýšená tlaková napjatost vzniká na místě původní hrany pēchovaného válce.



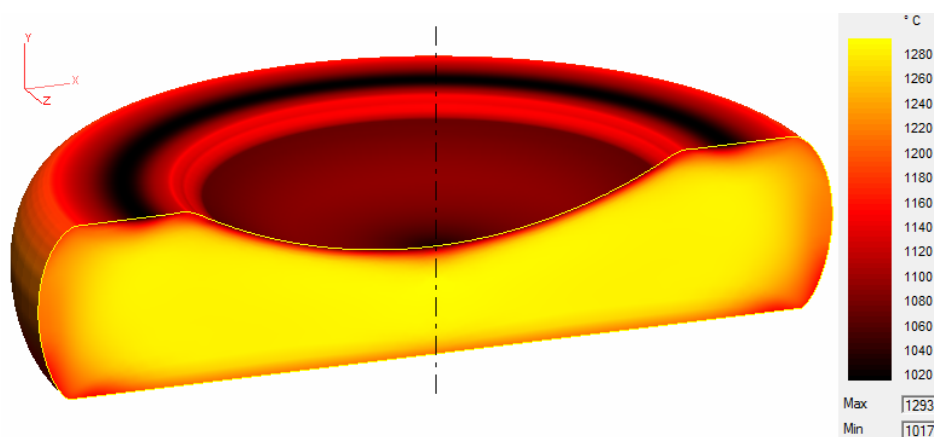
Obr. 7.1 Postupný tok materiálu operace pēchování (čas/vzdálenost nástrojů).



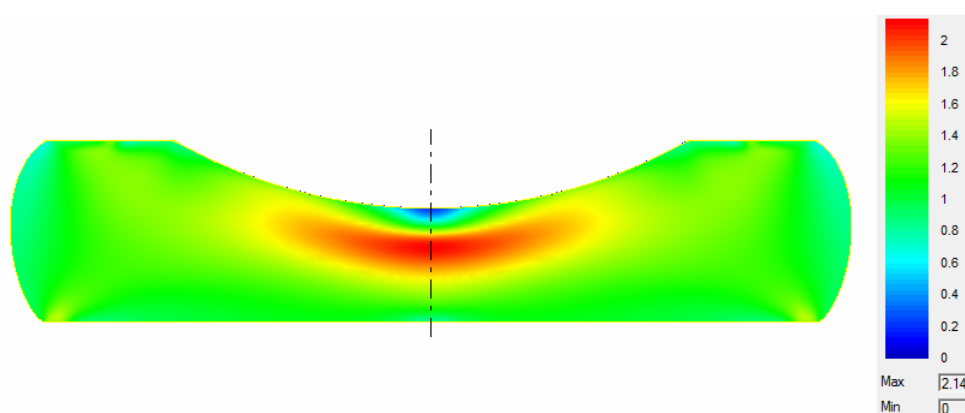
Obr. 7.2 Pracovní diagram operace pēchování.



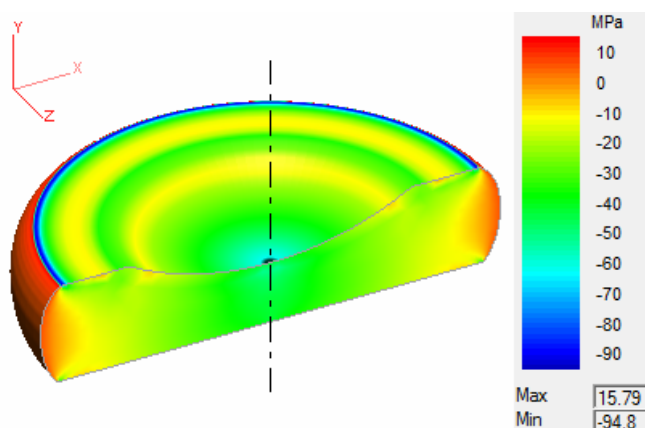
Obr. 7.3 Teplotní pole [°C] špalku před operací pēchování.



Obr. 7.4 Teplotní pole [°C] na konci operace pýchování.



Obr. 7.5 Intenzita deformace [-] operace pýchování.



Obr. 7.6 Střední hlavní napětí [MPa] operace pýchování.

7.2 Operace tvarování

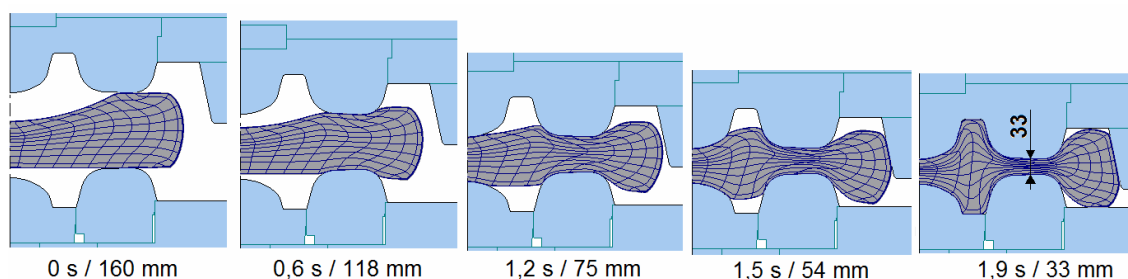
Změna tvaru v operaci tvarování je výrazná, náboj kola dostává již finální tvar s předkovanou dírou, zatímco deska a věnec dostávají přibližný tvar pro následující válcování. Čistý čas operace tvarování je 1,9 s. Maximální kovací síla procesu tvarování monobloku kola je 44,1 MN, zhruba 80 % nominální síly hydraulického lisu. Pracovní

diagram je uveden na obr. 7.8. Výrazný nárůst síly můžeme pozorovat v závěru zdvihu. Příčinou je postupné zaplňování dutiny náboje a věnce kola. Největší intenzitě deformace materiálu je tedy vystavena deska kola.

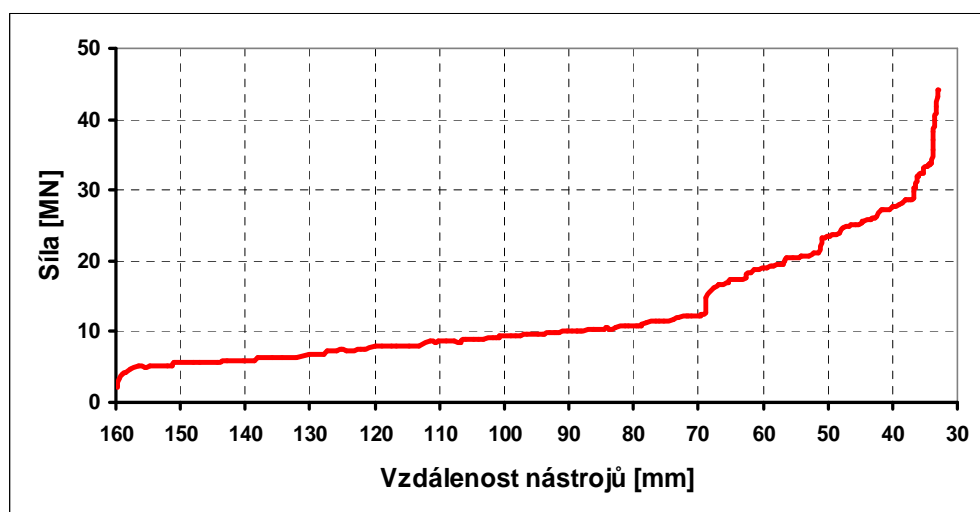
Postupný tok materiálu v zápustce zachycuje obr. 7.7, horní a dolní díl zápustky je zaplňován materiálem takřka stejnoměrně. Prakticky mohou nastat tři případy toku materiálu, tj. náboj je nezatečený, optimálně zatečený, nebo je přeplněn a dochází ke zpětnému toku materiálu.

Polotovar z operace pēchování má na vstupu do tvarování povrchovou teplotu mezi 1120–1200 °C (obr. 7.9). Tím se potvrdilo předpokládané prohřátí povrchových vrstev během prodlevy mimo nástroj. Během operace dojde k dalšímu ochlazování, které je ale vzhledem k času zdvihu (1,9 s) minimální. Nejmenší teplota na povrchu je 1114 °C (obr. 7.10). Před operací děrování a následně válcování lze očekávat další vyrovnání teplot ohřevem jádra a úplnou rekrystalizaci materiálu.

Intenzita deformace v operaci tvarování se v oblasti náboje pohybuje v rozmezí 0,6 [-] až 2,8 [-], v oblasti desky dochází k nárůstu až na hodnotu 3,2 [-] a v oblasti věnce postupně intenzita klesá až na hodnotu kolem 1,0 [-] (obr. 7.11).

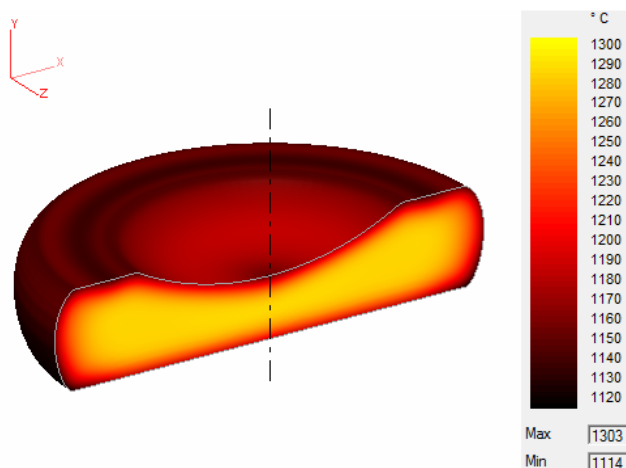


Obr. 7.7 Postupný tok materiálu operace tvarování (čas/vzdálenost nástrojů).

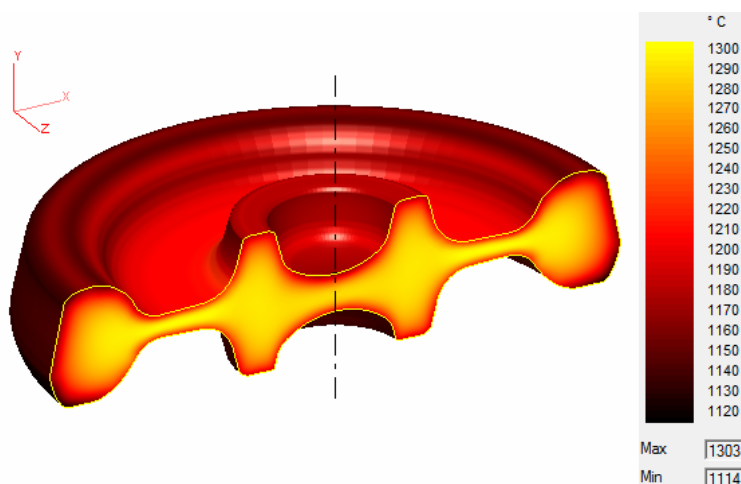


Obr. 7.8 Pracovní diagram operace tvarování.

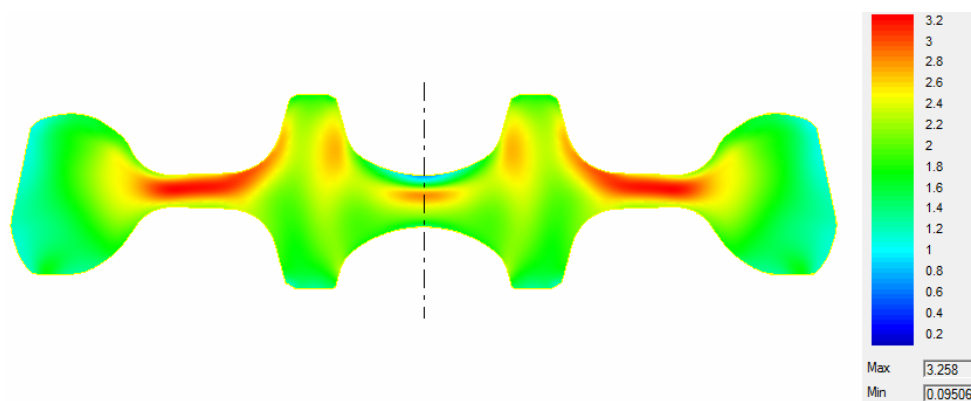
Na obr. 7.12 je zobrazeno rozložení středního hlavního napětí operace tvarování. V oblasti náboje a desky dostáváme záporné hodnoty, výjimkou jsou jen zaoblené hrany náboje, minimální hodnota je -195 MPa. V oblasti věnce se hodnoty hydrostatického napětí posunují i ke kladnému znaménku a pohybují se průměrně od -60 MPa do +20 MPa.



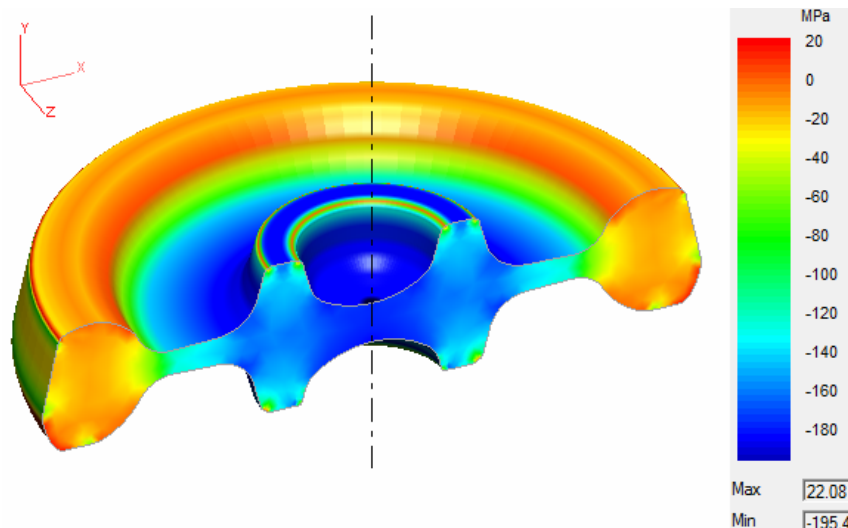
Obr. 7.9 Teplotní pole [°C] na začátku operace tvarování.



Obr. 7.10 Teplotní pole [°C] na konci operace tvarování.



Obr. 7.11 Intenzita deformace [-] operace tvarování.



Obr. 7.12 Střední hlavní napětí [MPa] operace tvarování.

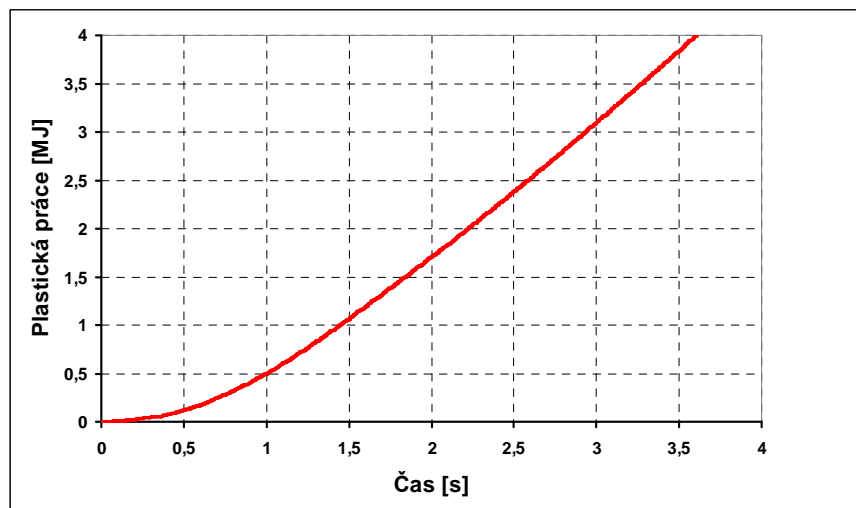
7.3 Operace válcování

Na obr. 7.13 je zachycen časový průběh plastické práce v počátku válcování. Operace děrování nebyla simulována, proto příslušné časy této operace byly nahrazeny procesem ochlazování materiálu na vzduchu (viz kap. 7.4). Teplotní pole na začátku operace zachycuje obr. 7.14. Při válcování kola dochází k dalšímu snížení teploty materiálu. Nejvíce se ochladí povrchové vrstvy náboje kola, kde se také nachází teplotní minimum 1008 °C. Ve spodních vrstvách materiálu náboje, desky a věnce kola se teplota pohybuje v rozmezí 1050–1150 °C (obr. 7.15).

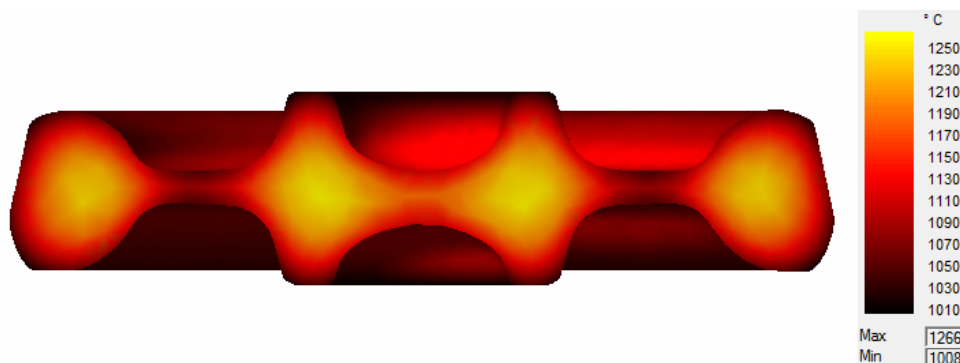
Rozložení intenzity deformace kola při válcování uvádí obr. 7.16. Největší deformaci prodělává materiál okolku kola, menší deformaci je vystavena deska kola a nejmenší intenzitě deformace je vystaven náboj kola. Proces válcování probíhá po šroubovici, proto můžeme pozorovat, že deska kola získává určitou kuželovitost. Šroubovice je v provozu seřizována s určitým ohledem na odchylky teplotního pole, resp. deformačního odporu materiálu, a osově symetrie válcovaných kol. Kuželovitost desky se tak udržuje ve stanovených tolerancích. V provedené simulaci je vzniklý kužel téměř symetrický dle svislé osy. Po válcování následuje operace, která prohne desku kola a zároveň celé kolo zkalibruje, čímž dojde k odstranění kuželovitosti desky a případné nesouososti náboje a věnce.

Špičkové hodnoty efektivního napětí jsou v kontaktních místech kola a jednotlivých válců (obr. 7.17). Největší hodnoty napětí je dosaženo na kontaktních plochách kola a tlačných válců, které nemají udělenou vlastní posuvovou rychlost a jsou válcovaným kolem odtlačovány.

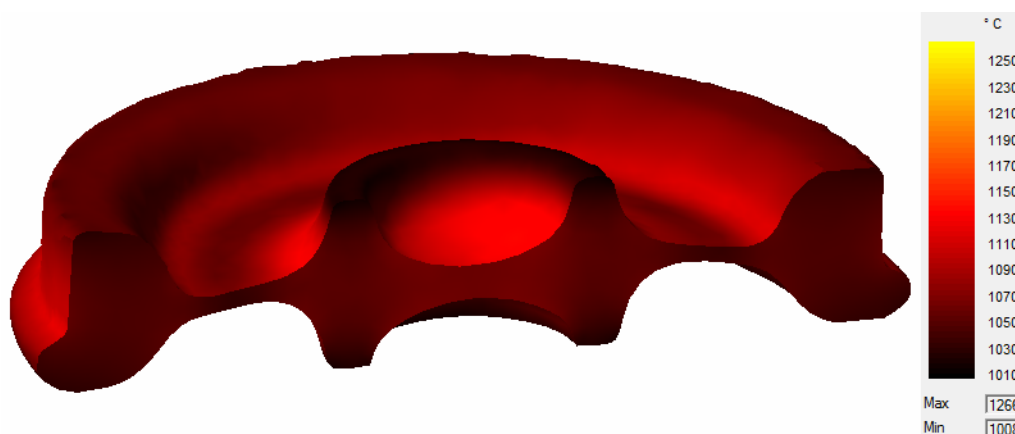
Na obr. 7.18 je zobrazeno rozložení středního hlavního napětí operace válcování. V oblasti náboje a desky kola dostáváme hodnoty přibližně kolem nuly, respektive v rozsahu od -15 MPa do 15 MPa. V oblasti věnce mají hodnoty hydrostatického napětí na kontaktních plochách s válcí záporné znaménko. Minimální hodnota středního napětí dosahuje -159 MPa.



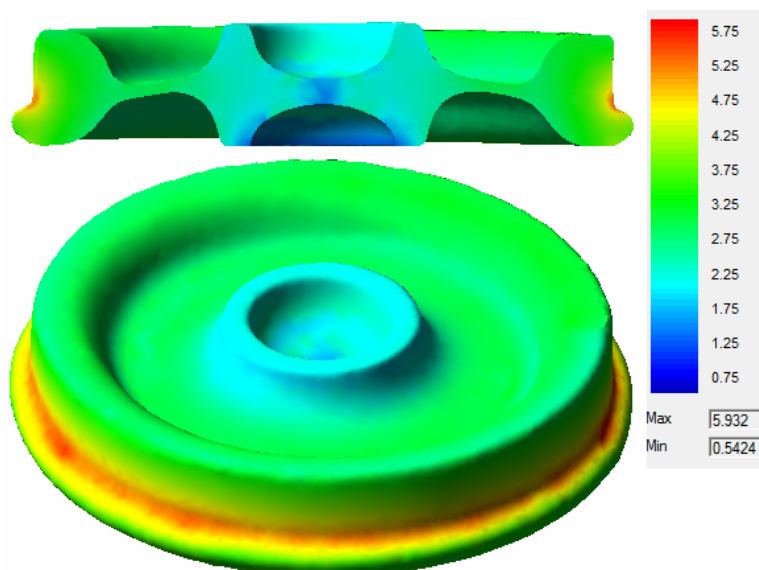
Obr. 7.13 Časový průběh plastické práce v počátku válcování.



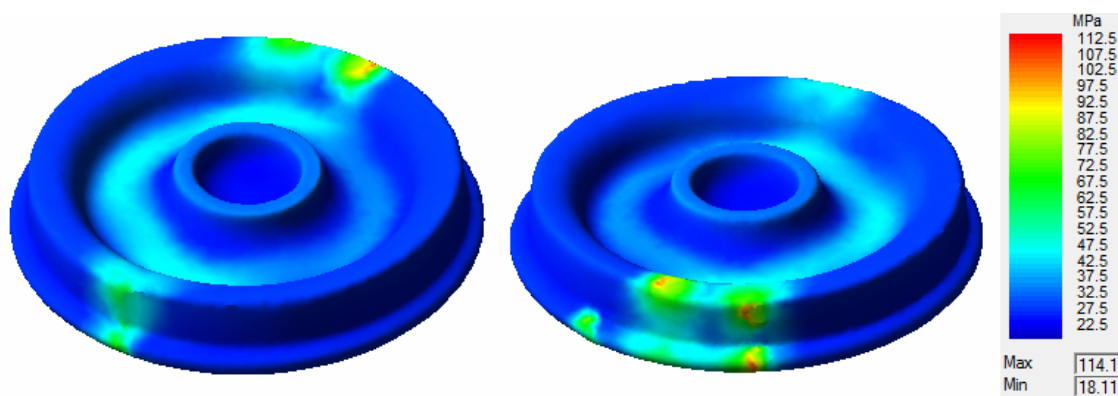
Obr. 7.14 Teplotní pole [°C] na začátku operace válcování.



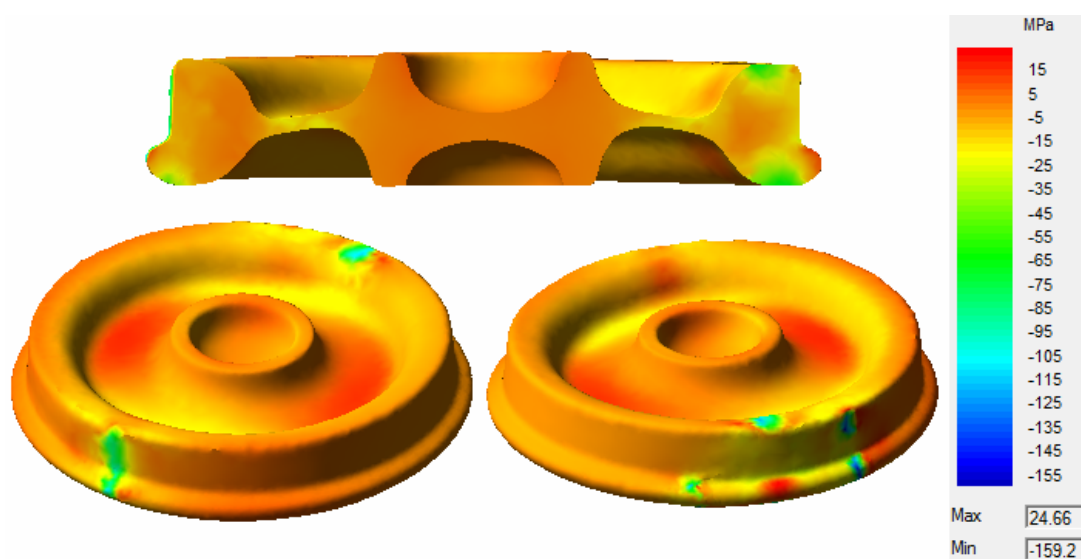
Obr. 7.15 Teplotní pole [°C] na konci operace válcování.



Obr. 7.16 Intenzita deformace [-] operace válcování.



Obr. 7.17 Efektivní napětí [MPa] kola při operaci válcování.



Obr. 7.18 Střední hlavní napětí [MPa] operace válcování.

7.4 Časový režim operací tváření monobloku kola

Tab. 7.1 uvádí srovnání provozních a simulovaných časů jednotlivých operací a úkonů tváření monobloku kola. Naměřené provozní časy byly převzaty z publikace [1]. Operace děrování a prohýbání nebyly simulovány, proto příslušné časy simulací nejsou uvedeny. U předkovku, který vstupuje do operace válcování, byly časy potřebné pro děrování nahrazeny chlazením materiálu na vzduchu (25,0 s). Proces postupného chladnutí materiálu tak nebyl narušen.

Tab. 7.1 Časový režim operací a úkonů tváření monobloku kola.

	Operace/úkon	Měření	QForm
1.	Odkujení	32,0 s	32,0 s
2.	Před přechováním	26,0 s	26,0 s
3.	Přechování	7,0 s	5,2 s
4.	Po přechování	10,0 s	10,0 s
5.	Přesun nástroje	4,0 s	4,0 s
6.	Před tvarováním	9,0 s	9,0 s
7.	Tvarování	2,0 s	1,9 s
8.	Po tvarování	15,0 s	15,0 s
9.	Přesun kola	17,0 s	25,0 s (nahrazeno)
10.	Děrování	8,0 s	
11.	Přesun kola	52,0 s	52,0 s
12.	Válcování	33,0 s	33,0 s
13.	Přesun kola	37,0 s	–
14.	Prohýbání	12,0 s	–
	Celkem	264,0 s	–

8 Analýza opotřebení a životnosti komponent tvářecích nástrojů

8.1 Faktory ovlivňující opotřebení a životnost nástrojů

Životnost a opotřebení tvářecích nástrojů ovlivňuje celá řada činitelů, které souvisí s vlastnostmi nástroje a výkovku, parametry stroje, zvoleným technologickým postupem a zkušenostmi obsluhy. Při tváření za tepla jsou nástroje vystaveny mechanickému a tepelnému namáhání. Tato namáhání se během jednotlivých operací cyklicky opakují.

Síly působící při kování vyvolávají stlačování a roztahování zápustky. Kromě toho dochází v zápustce k otěru. Od zápustky proto požadujeme na jedné straně odolnost proti vysokým tlakům a na druhé straně dostačující houževnatost [7].

Příliš vysoká provozní teplota snižuje pevnost funkčních částí nástroje a zvyšuje plastické vlastnosti oceli. Je tak podporována deformace nástroje, zvyšuje se opotřebení otěrem a dochází k rychlejší ztrátě rozměrů. Periodické střídání teplot, které vzniká při neustálém ohřevu a ochlazování nástroje, vyvolá objemové změny. V povrchových vrstvách nástroje vzniká pnutí a dochází k tvorbě sítě trhlinek. Trhlinky tepelné únavy podporují rychlejší opotřebení nástroje, popř. mohou být zárodkem větších trhlin a únavových lomů. Tvářený materiál zatéká do těchto trhlinek, což podporuje jejich růst [7].

Obecně platí, že čím je výkovek členitější, tím menší je životnost zápustky. Naopak, čím je jednodušší, tím větší je životnost zápustky. U členitých výkovků nelze zápustkové dutiny zaplnit jen přechováním, ale materiál ještě teče kolem přechodů. V těchto případech jsou hrany i výstupky v dutině namáhány větším tlakem a mají také větší opotřebení. Z toho plyne, že čím méně se musí materiál přemisťovat, tím menší je opotřebení a tím větší je životnost zápustek. To lze uskutečnit vhodnou úpravou předkovku a správným určením hmotnosti výchozího polotovaru.

Přechody a zaoblení hran volíme podle velikosti výkovku pokud možno co největší. Velká zaoblení vedou sice k větší spotřebě kovu, malá zaoblení zase ztěžují tok kovu, způsobují rychlejší opotřebení hran zápustky a mohou vést k porušení trhlinou [15].

Životnost nástrojů je rovněž snižována hmotností výkovku. Důležitým faktorem životnosti je i druh tvářeného materiálu a materiál nástroje. Tvářené materiály mají v předepsaném rozmezí kovacích teplot různou pevnost, různě se nalepují na funkční části nástroje, zdrsňují jeho povrch a zhoršují zatékání v dutině. Při navrhování nástroje volíme materiály s různou hodnotou dovoleného namáhání. Velké hodnoty dovoleného namáhání zvyšují sice odolnost proti otěru a plastické deformaci, ale zároveň snižují

houževnatost a odolnost proti tvorbě trhlinek tepelné únavy. Malé hodnoty dovoleného namáhání zvyšují houževnatost, ale rovněž způsobují rychlou rozměrovou a tvarovou ztrátu zápustkové dutiny vlivem zvýšeného otěru a plastické deformace.

Před kováním je nutné nástroje rovnoměrně předeheřt na 200 °C až 300 °C. Nestačí-li množství tepla předaného výkovky k udržení těchto teplot, je třeba nástroje přehřívat i při provozu. Požadavek předeheřvu je tím důležitější, čím členitější je tvar zápustkové dutiny a čím více má dutina ostrých záhybů, klínů (vrubů). Nedodržení tohoto požadavku vede k praskání zápustek. Předeheřv zápustek snižuje tepelná pnutí a teplotní gradienty mezi povrchem dutiny a jádrem. Při styku výkovku s předeheřtovanou zápustkou se zpomaluje rychlost ochlazování výkovku. Pomalejší pokles teploty zabraňuje vzrůstu pevnosti tvářeného materiálu a zvyšování měrných tlaků v dutině zápustky. Snižuje se tím opotřebení dutiny plastickou deformací a otěrem [7].

Pro snížení otěru nástrojů je důležité použít mazivo. Jednotlivé druhy maziv mají různé vlastnosti a různý vliv na opotřebení zápustky. Dále je nutno dodržet hodnoty drsností funkčních ploch, které jsou předepsány normou. Povrch s nižší drsností má větší odolnost proti tvoření síťových trhlinek.

Pro zvýšení životnosti a snížení opotřebení se rovněž používají povrchové úpravy nástrojů. Mezi moderní metody patří fyzikální metoda PVD a chemická metoda CVD. Povlak sníží součinitel tření, zlepší fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy, zajistí vyšší tvrdost povrchu nástroje a větší odolnost proti otěru a konečně dojde ke snížení kontaktního tlaku mezi nástrojem a materiálem.

8.2 Vyhodnocení životnosti nástrojů pomocí aplikace QForm

Životnost nástroje je komplexní funkcí součinitele tření, teploty a její distribuce do povrchových vrstev nástroje, materiálu nástroje, geometrie nástroje a kvality jeho povrchu, kontaktního napětí, relativní rychlosti toku materiálu v kontaktu, chemické reakce mezi mazivem a materiálem nástroje a dalších.

V závislosti na podmínkách tvářecího procesu, které jsou charakteristické pro materiál nástroje a stav jeho povrchu, můžou nastat tyto poruchy tvářecích nástrojů:

- opotřebení (adhezivní, abrazivní, oxidační),
- tepelná únava,
- mechanická únava,
- plastická deformace.

Pro odhad životnosti nástroje a pro případnou úpravu jeho konstrukce je důležité rozložení efektivního napětí v různých místech funkčních částí. Výkovek železničního kola je složitý nejen z hlediska tvaru, ale rovněž musíme brát ohled na úroveň kovacích sil a velké teplotní gradienty v materiálu a v nástroji. Špičková místa namáhání nástrojů budou náchylná k tvorbě trhlin a k dalšímu poškození.

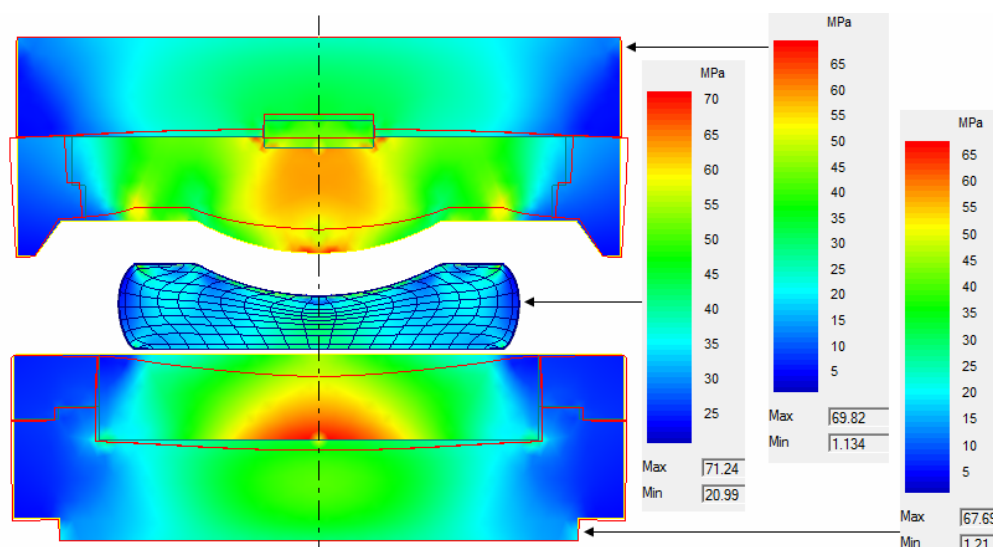
8.3 Namáhání nástrojů

Ukazatelem namáhání nástroje je intenzita napětí (neboli efektivní, ekvivalentní napětí) působící v jeho jednotlivých elementech. Intenzita napětí vyjadřuje současný účinek jednotlivých složek napjatosti v daném tělese a určuje velikost deformačního odporu proti změně tvaru [9]. Níže je popsáno namáhání nástrojů jako odezva na interakci s kovaným polotovarem.

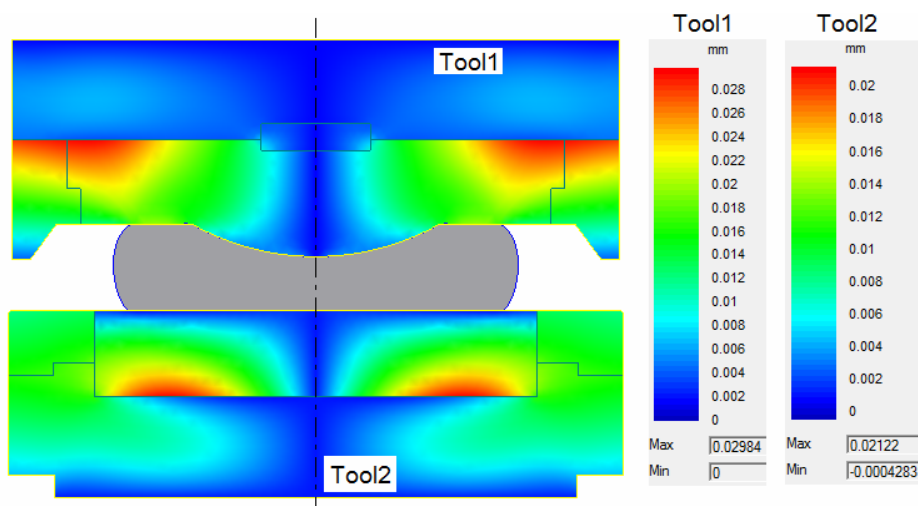
8.3.1 Operace přechování

Namáhání nástroje bylo analyzováno při maximálním zatížení tvářecí silou. Nejvíce namáhanou částí horní poloviny nástroje je oblast nad kulovou plochou, hodnoty intenzity napětí se zde pohybují kolem 60 MPa (obr. 8.1). Intenzita napětí dolní poloviny nástroje nabývá obdobných hodnot. Maximální intenzity napětí je dosaženo v ose přechovací desky. Celková úroveň efektivního napětí ve složeném přechovacím nástroji je velmi nízká vzhledem ke zvolenému materiálu jakosti 11 800, který disponuje hodnotou dovoleného namáhání 330 MPa. Vzniká tak předpoklad delší životnosti přechovací zápusťky. U nástroje je však nutno brát ohled na značné cyklické namáhání tepelné a mechanické, kterému je při tváření špalku vystaven.

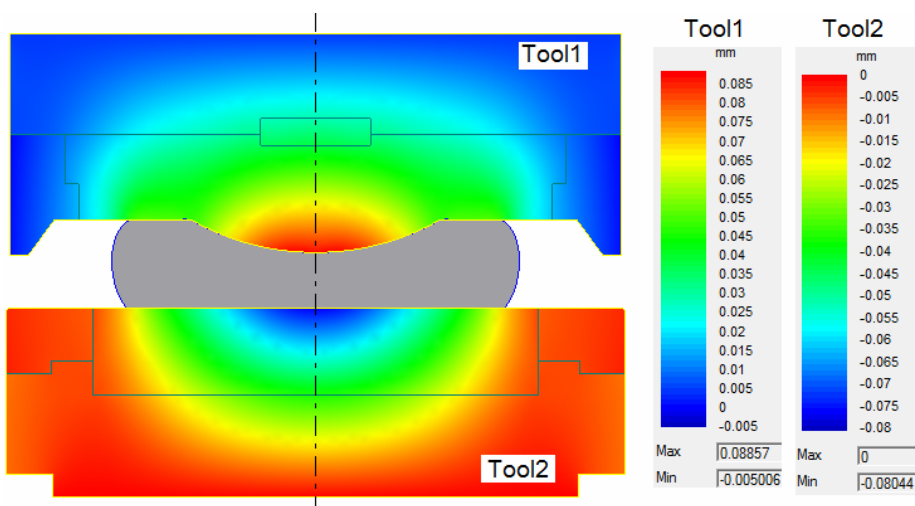
Deformace (posunutí) obrysu nástroje ve vodorovné ose je zachyceno na obr. 8.2, ve svislé ose na obr. 8.3. Z výsledků je patrné, že deformace obrysu má v obou polovinách nástroje přibližně stejné rozložení. Ve vodorovném směru je hodnota maximálního posunutí horní poloviny nástroje 0,03 mm, dolní poloviny 0,02 mm. Ve svislém směru se hodnoty maximálního posunutí horní poloviny nástroje nachází v oblasti nad kulovou plochou, maximální hodnota činí 0,09 mm. Dolní polovina vykazuje ve svislém směru v ose desky záporných hodnot posunutí, minimální hodnota činí -0,08 mm.



Obr. 8.1 Efektivní napětí [MPa] v nástroji a polotovaru při operaci pýchování s naznačením deformovaného obrysu.



Obr. 8.2 Deformace (posunutí) obrysu [mm] nástroje ve vodorovném směru.

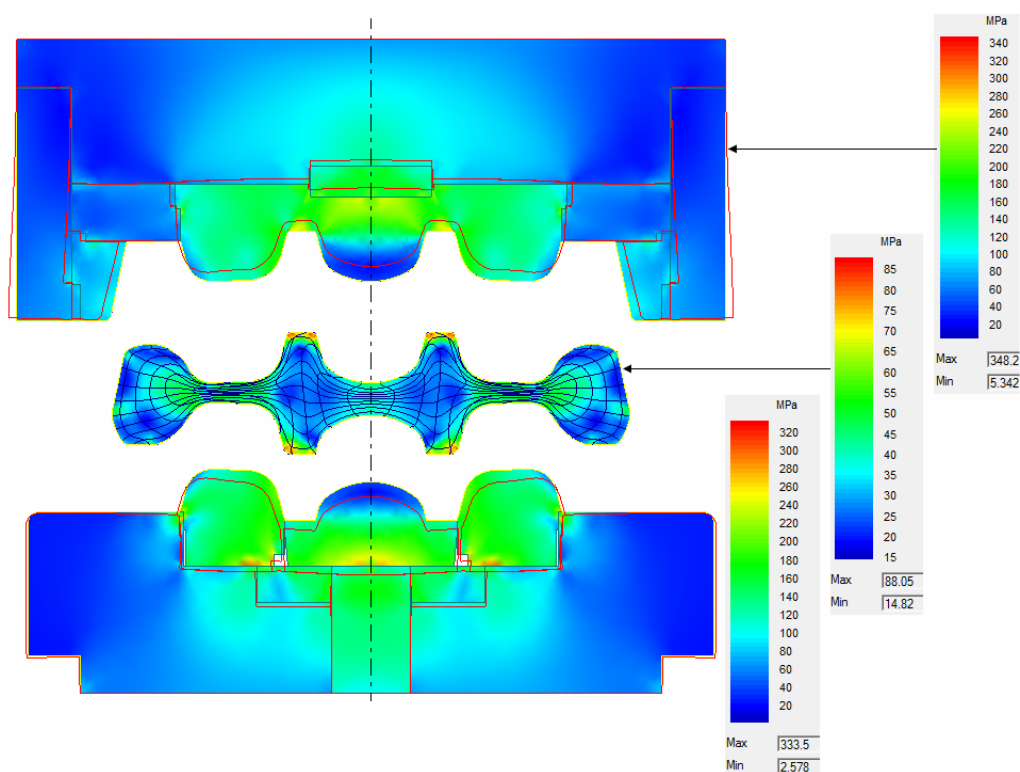


Obr. 8.3 Deformace (posunutí) obrysu [mm] nástroje ve svislém směru.

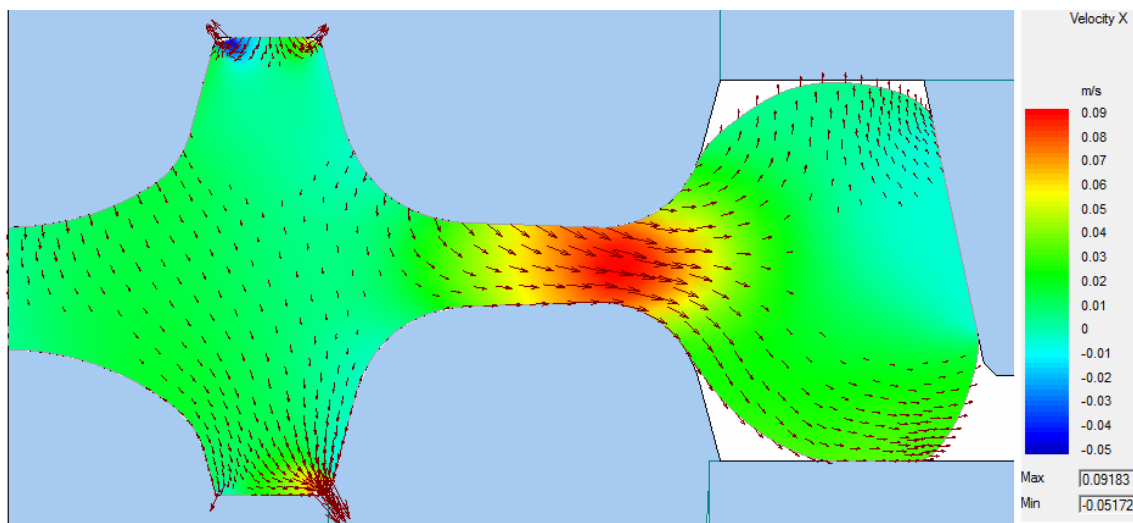
8.3.2 Operace tvarování

V operaci tvarování dosahuje intenzita napětí v nástroji již výraznějších hodnot. Horní polovina nástroje je nejvíce namáhána v oblasti nad žaludem a v oblasti nábojové dutiny. Špičky napětí můžeme pozorovat na hranách nábojové dutiny. Maximální hodnota dosahuje 348 MPa a mírně již překračuje dovolené namáhání nástrojového materiálu (330 MPa). Teplota polotovaru se v těchto místech pohybuje kolem 1200 °C a v kombinaci s cyklickým namáháním lze předpokládat nízkou životnost funkční části horní poloviny zápustky. Hrozí zde nebezpečí vzniku tepelných trhlin. Relativně nízké je mechanické namáhání středového žaludu. Intenzita napětí dolní poloviny nástroje vykazuje nejvyšší hodnoty na ostrých hranách vložky, které však mají jen vrubový charakter a nejsou v přímém kontaktu s materiálem. Podobně jako horní polovina je i dolní polovina nástroje nejvíce namáhána na stěnách nábojové dutiny. Lze tedy předpokládat, že oba díly nástroje budou mít na těchto plochách menší životnost. Špičková hodnota je 334 MPa, což stejně jako u horní poloviny nástroje znamená mírné překročení dovoleného namáhání nástrojového materiálu.

Pro eliminaci opotřebení nástroje je důležitá rovněž kontrola toku materiálu, nemělo by docházet k předčasnému zaplnění dutiny náboje kola a zpětnému toku materiálu, který zvýší tlak v nástroji a může být iniciátorem trhlin (obr. 8.5).

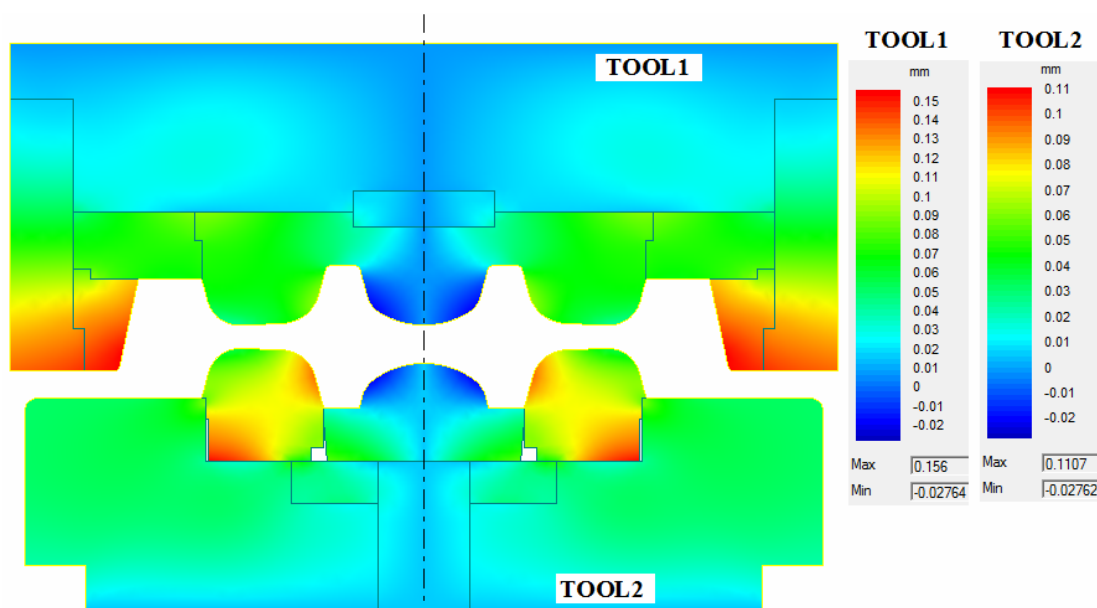


Obr. 8.4 Efektivní napětí [MPa] v nástroji a výkovku při operaci tvarování s naznačením deformovaného obrysu.

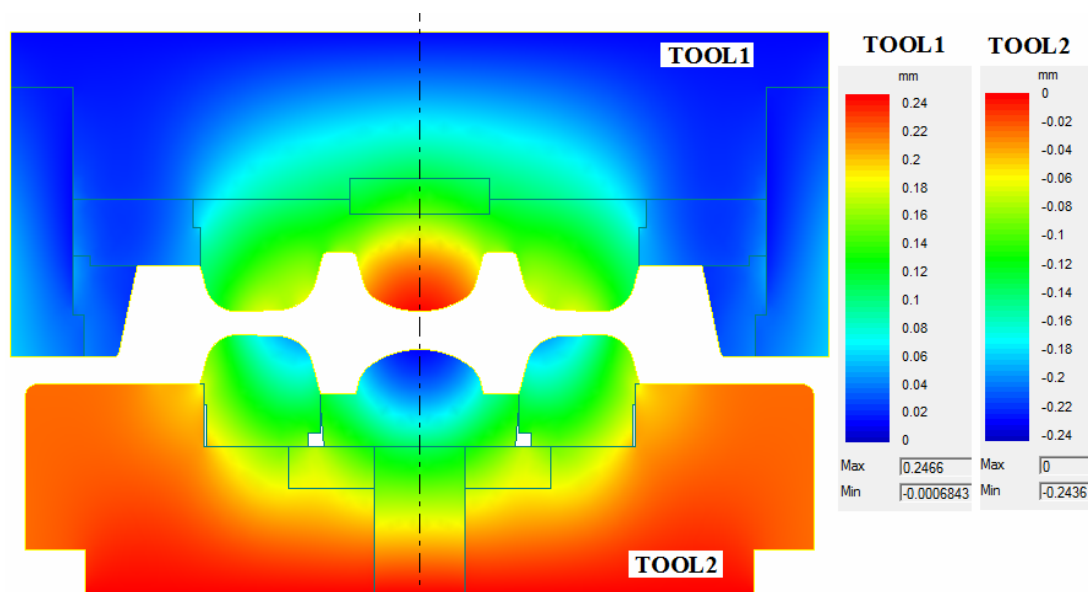


Obr. 8.5 Rychlost toku materiálu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] ve vodorovné ose.

V operaci přechování byl obrys nástroje deformován jen v setinách milimetru, v operaci tvarování dochází k nárůstu hodnot na desetiny milimetru. Deformace (posunutí) obrysu nástroje ve vodorovné ose je zachyceno na obr. 8.6, ve svislé ose na obr. 8.7. Výsledky ukazují, že deformace obrysu je stejně jako u operace přechování pro obě poloviny nástroje srovnatelná. Ve vodorovném směru je hodnota maximálního posunutí horní poloviny nástroje 0,16 mm, dolní poloviny 0,11 mm. Ve svislém směru se hodnoty maximálního posunutí horní poloviny nástroje nachází v oblasti žaludu, maximální hodnota činí 0,25 mm. Dolní polovina nástroje vykazuje ve svislém směru záporné hodnoty posunutí, minimální hodnota činí -0,24 mm.



Obr. 8.6 Deformace (posunutí) obrysu [mm] nástroje ve vodorovném směru.



Obr. 8.7 Deformace (posunutí) obrysu [mm] nástroje ve svislém směru.

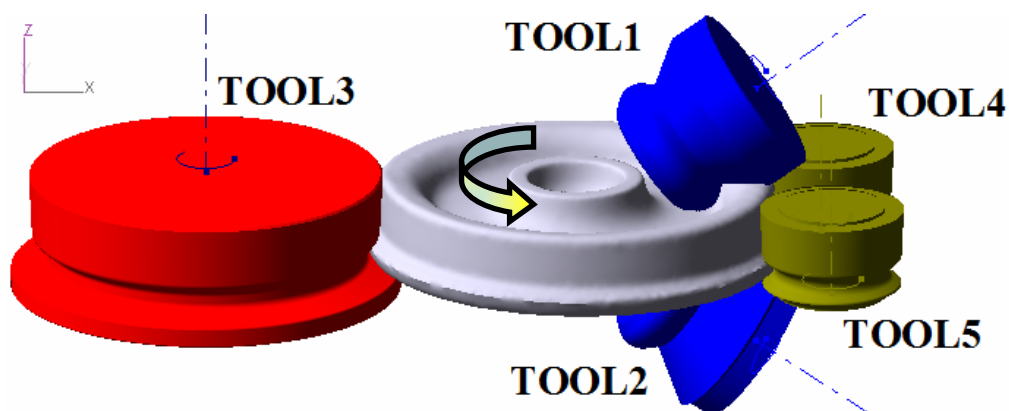
8.3.3 Operace válcování

V operaci válcování byly sledovány hodnoty efektivního napětí a kontaktních tlaků při maximálním silovém zatížení přítlačných válců (tool4, tool5). Časový průběh celkové síly (součet ve všech osách) působící na válce zachycuje obr. 8.9. Hodnota celkové síly dolního šikmého válce (tool2) a hlavního válce (tool3) se pohybuje kolem nuly, proto také není hlavní válec v grafu zachycen. Popis jednotlivých válců pro vyhodnocení jejich namáhání je na obr. 8.8. Souhrnný výčet maximálních hodnot sledovaných veličin uvádí tab. 8.1.

Nejvyšší hodnoty efektivního napětí byly zaznamenány u horního šikmého válce a tlačných válců. Tyto tři válce jsou rozhodující pro přetváření materiálu a jsou zatíženy největšími silami. Maximální efektivní napětí horního šikmého válce je ve srovnání s dolním válcem přibližně šestkrát větší. Vysoký nárůst efektivního napětí je způsoben tím, že horní válec se pohybuje ve dvou směrech, přičemž současně tvaruje desku kola a pěchuje jeho věnec. Dolní šikmý válec se pohybuje jen ve vodorovném směru, podílí se na tvarování desky a válcované kolo podpírá. Hlavní válec, který má rovněž nízkou hodnotu maximálního efektivního napětí, stabilizuje proces válcování a podpírá válcované kolo.

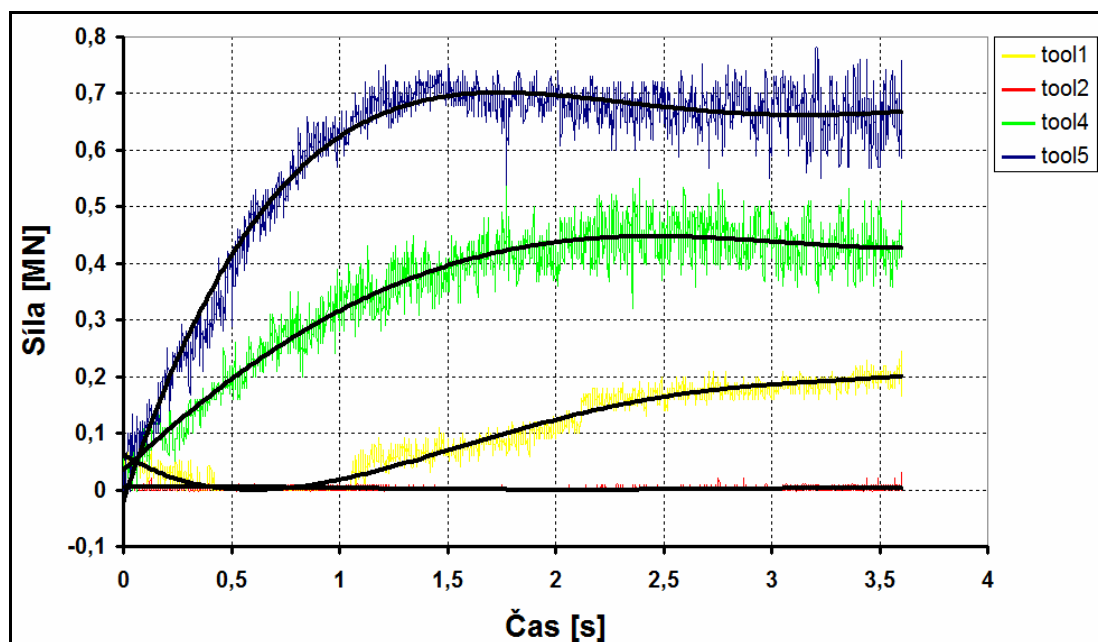
Hodnoty maximálních kontaktních tlaků válců jsou již vyrovnanější. Šikmé válce mají prakticky stejné hodnoty. U tlačných válců a hlavního válce dochází k postupnému nárůstu hodnot ve směru válcování. Nejmenší kontaktní tlak má tedy první tlačný válec (tool5), větší hodnotu má druhý tlačný válec (tool4) a největší kontaktní tlak vykazuje

hlavní válec (tool3). Důvodem vysokých hodnot kontaktního tlaku jsou právě šikmé válce, které válcují materiál a tlačí ho směrem k ostatním válcům. Tlačné válce nemají navíc udělenou posuvovou rychlost a jsou válcovány kolem odtlačovány.



Obr. 8.8 Popis nástrojů operace válcování.

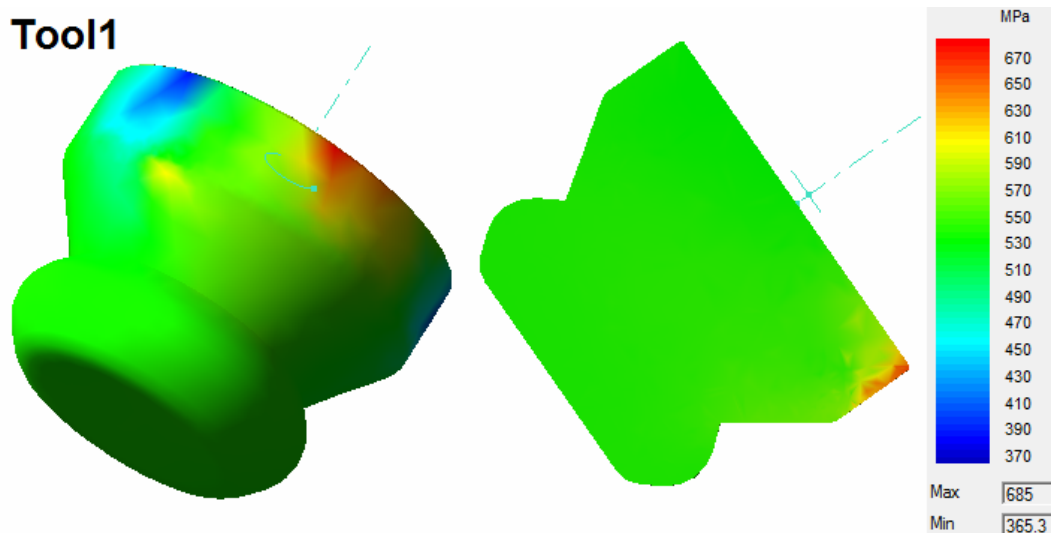
Maximální efektivní napětí válců dosahuje ve srovnání s dovoleným namáháním nástrojového materiálu (1250 MPa) nízkých hodnot. Rozhodující vliv bude mít vysoké cyklické tepelné namáhání a s tím spojené povrchové opotřebení nástrojů. To je potvrzeno i vysokými hodnotami kontaktních tlaků, které budou iniciátory povrchových trhlinek. Kritickým místem, kde můžeme předpokládat největší opotřebení, jsou pro tlačné válce a hlavní válec plochy a hrany, na kterých se formuje okolek. Pro šikmé válce jsou kritické kuželové plochy, které pěchují věnec kola.



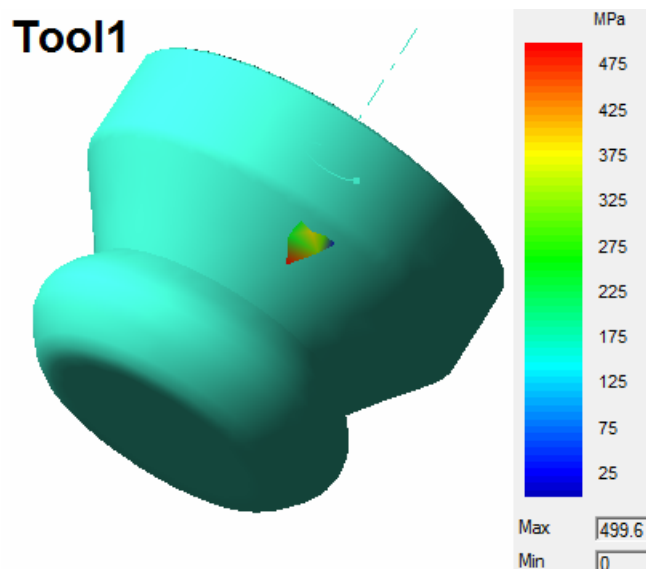
Obr. 8.9 Časový průběh sil působících na nástroje operace válcování.

Tab. 8.1 Maximální hodnoty sledovaných veličin namáhaných válců.

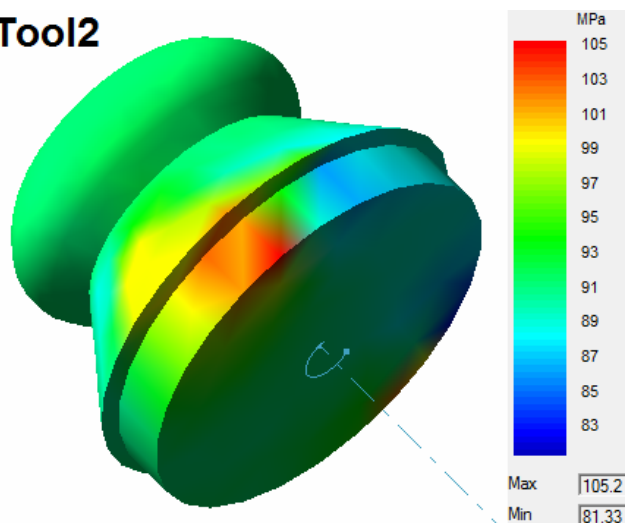
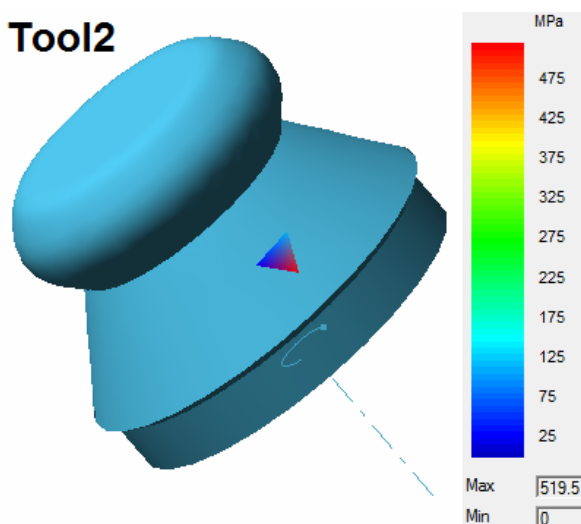
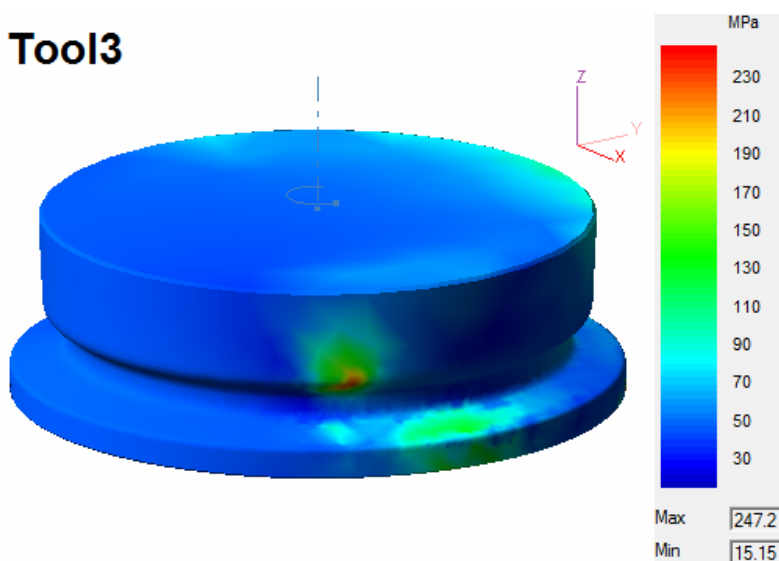
Nástroj	Efektivní napětí [MPa]	Kontaktní tlak [MPa]
TOOL1	685	500
TOOL2	105	520
TOOL3	247	991
TOOL4	511	916
TOOL5	391	713

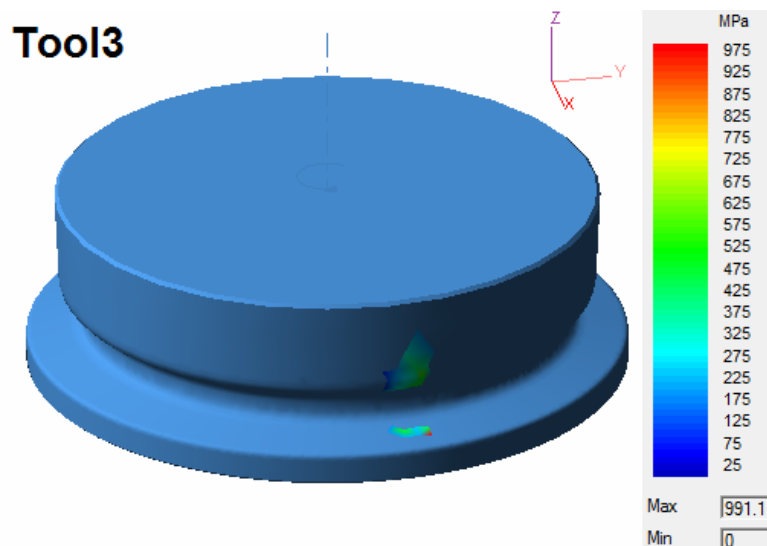


Obr. 8.10 Rozložení efektivního napětí [MPa] pro horní šikmý válec.

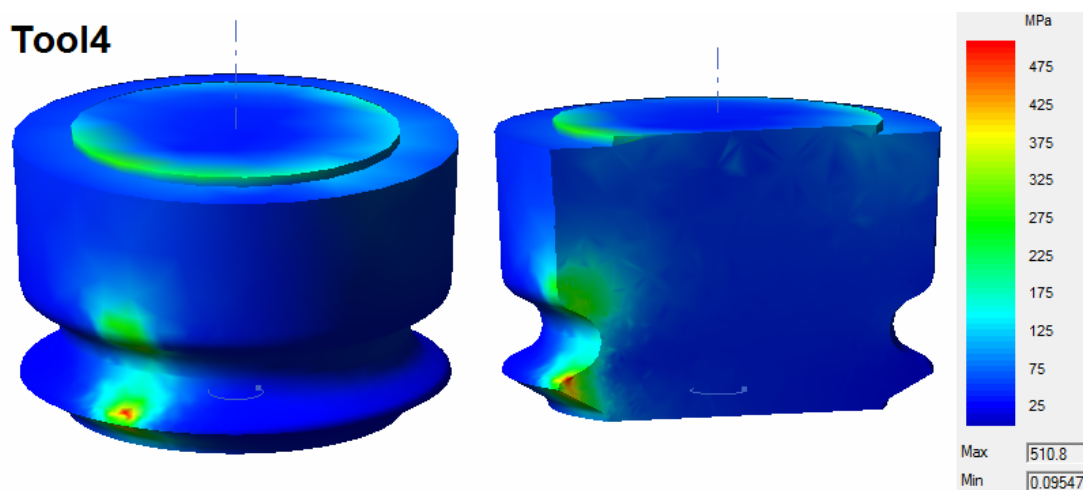


Obr. 8.11 Kontaktní napětí [MPa] horního šikmého válce.

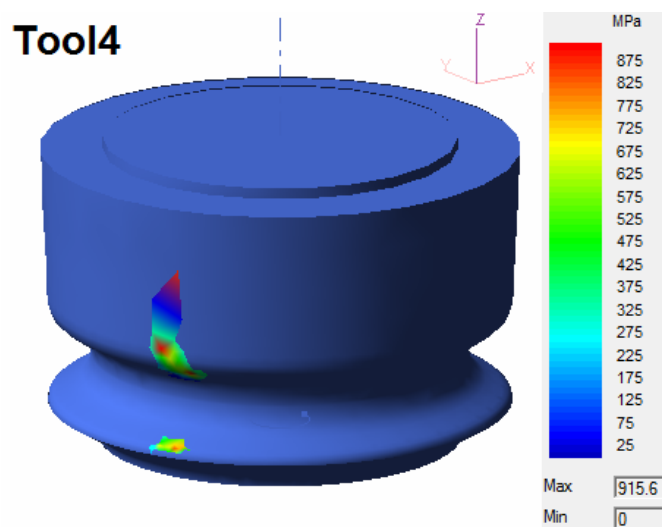
Tool2*Obr. 8.12 Rozložení efektivního napětí [MPa] pro dolní šikmý válec.***Tool2***Obr. 8.13 Kontaktní napětí [MPa] dolního šikmého válce.***Tool3***Obr. 8.14 Rozložení efektivního napětí [MPa] pro hlavní válec.*



Obr. 8.15 Kontaktní napětí [MPa] hlavního válce.

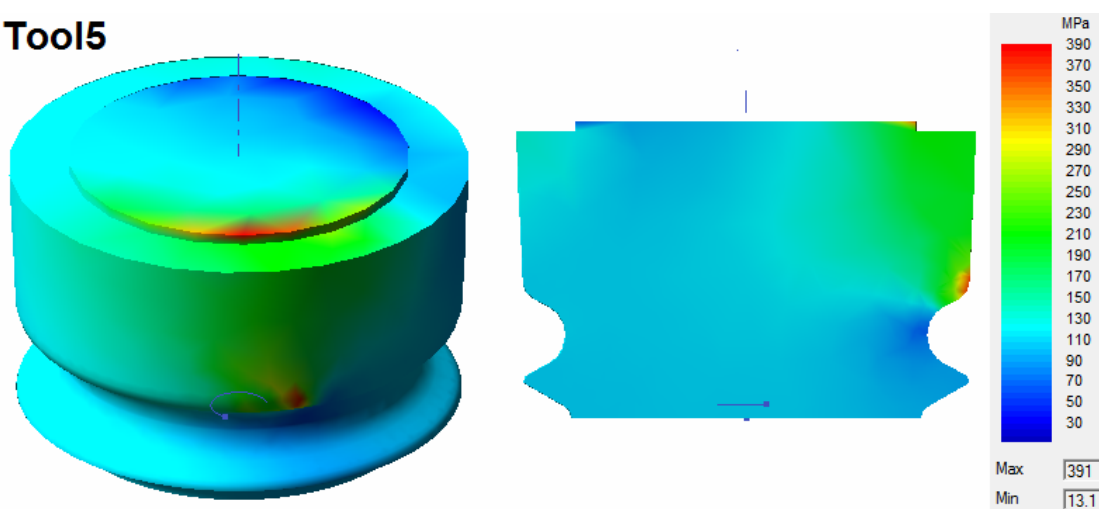


Obr. 8.16 Rozložení efektivní napětí [MPa] pro první tlačný válec.



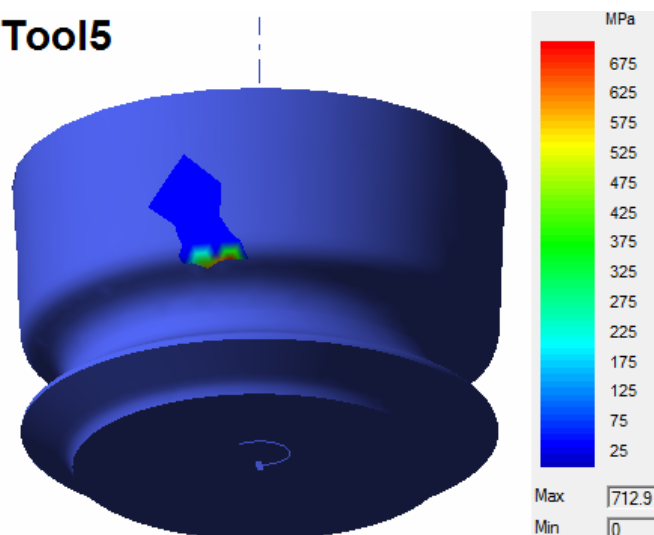
Obr. 8.17 Kontaktní napětí [MPa] prvního tlačného válce.

Tool5



Obr. 8.18 Rozložení efektivního napětí [MPa] pro druhý tlačný válec.

Tool5



Obr. 8.19 Kontaktní napětí [MPa] druhého tlačného válce.

9 Odhad životnosti tvářecích nástrojů pro výrobu monobloku kola

9.1 Teoretický rozbor odhadu životnosti nástroje [14]

Zápustky jsou při operaci přechovávání a tvarování na hydraulickém lise namáhána časově proměnnými silami. Totéž platí i pro jednotlivé válce při válcování kola na horizontální válcovací stolici. Účinky těchto sil jsou odlišné od účinků stejně velkých sil statických. Výsledkem časově proměnných sil je deformace a následná únava materiálu, která rozhoduje o životnosti součástí.

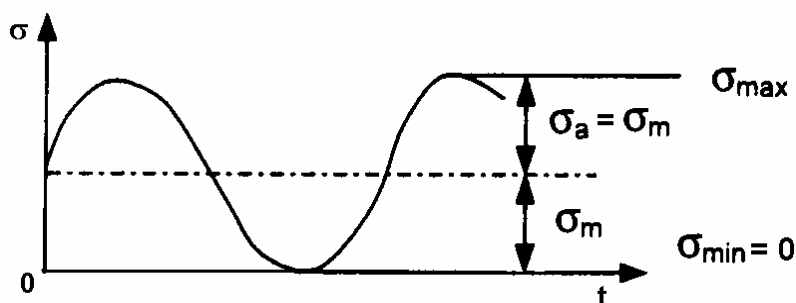
Únavu lze posuzovat z hlediska úrovně deformací nebo úrovně napětí, které vedou k porušení materiálu. Prvý přístup se využívá u nízkocyklického namáhání (pod 1000 cyklů), kde plastické složky deformací hrají významnou úlohu. Pro zápustky a válce, které jsou namáhány provozním namáháním, se využije druhý přístup, kde se úroveň napětí pohybuje v pružné oblasti a počet cyklů do porušení materiálu je relativně vysoký.

Cyklické namáhání je charakterizováno amplitudou napětí σ_a (1) a středním napětím σ_m (2).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Zápustka volná nebo bez vůle podepřená v sestavě nástroje je namáhána mívivým cyklem, kde se $\sigma_{\min} = 0$. Rovněž i válce horizontální válcovačky jsou namáhány mívivým cyklem, kdy je jeden cyklus roven jedné otáčce příslušného válce. Dosazením nuly do rovnic (1) a (2) zjistíme, že $\sigma_m = \sigma_a$. Časový průběh mívivého cyklu zatížení je na obr. 9.1.



Obr. 9.1 Mívivý cyklus zatížení [14].

K odhadu životnosti nástrojů namáhaných cyklickým provozním zatížením se může použít Haighův diagram (obr. 9.2). K odhadu musí být stanovena dovolená mez únavy σ_u , amplituda napětí σ_a a střední napětí σ_m kritického zatížení nástroje. Dovolenu mez únavy můžeme vyjádřit jako

$$\sigma_u = \frac{\sigma_c}{k_c} \text{ [MPa]}, \quad (3)$$

kde je σ_c – časová mez únavy, $\sigma_c = \frac{R_e}{4}$ [MPa],

k_c – koeficient bezpečnosti, $k_c \approx 1,0 - 1,4$ [-].

Amplitudu napětí σ_a a střední napětí σ_m kritického zatížení nástroje lze stanovit při analýze MKP. Pro výpočet byly využity výsledky simulace jednotlivých operací v programu QForm.

Závislost mezi σ_a , σ_m a materiálovými vlastnostmi, jako je dovolená mez únavy σ_u , mez kluzu R_e nebo mez pevnosti R_m lze vyjádřit několika vztahy. K sestrojení zjednodušeného Haighova diagramu bylo využito Goodmanových rovnic (4), (5).

$$\text{pro } N_\infty \text{ cyklů: } \frac{\sigma_a}{\sigma_u} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \quad (4)$$

$$\text{pro } N \text{ cyklů: } \frac{\sigma_a}{\sigma_N} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \quad (5)$$

Přímka spojující mez pevnosti R_m (σ_p) na vodorovné ose a dovolenou mez únavy σ_u na svislé ose je uvažována za limitní s životností $10^7 \equiv \infty$ cyklů. Přímka pro 10^3 cyklů je považována za mez nízkocyklové únavy.

σ_N označuje mez únavy pro daný cyklus, kterou při absenci experimentálních dat určíme ze vztahu

$$\sigma_N = \sigma_u \cdot \sqrt[m]{\frac{N_\infty}{N}} \text{ [MPa]}, \quad (6)$$

kde je σ_u – dovolená mez únavy cyklu [MPa],

N_∞ – 10^7 cyklů,

N – požadovaný počet cyklů [1],

m – konstanta, $m = 6 - 10$ [-].

Počet cyklů N určíme ze vztahu

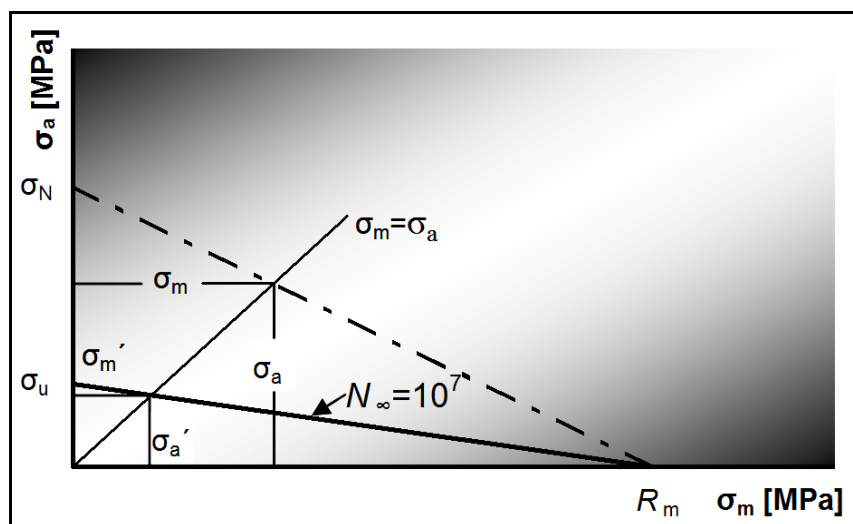
$$N = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_N} \right)^6 \cdot N_\infty \quad [1], \quad (7)$$

kde je σ_u – dovolená mez únavy cyklu [MPa],

$N_\infty = 10^7$ cyklů,

σ_N – mez únavy daného cyklu [MPa], pro hledaný cyklus počítáme ze vztahu (8).

$$\sigma_N = \frac{\sigma_a \cdot R_m}{R_m - \sigma_m} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$



Obr. 9.2 Haighův diagram; plná čára pro N_∞ cyklů; čerchovaná čára pro N cyklů.

9.2 Ukázka výpočtu odhadu životnosti zápusky pro operaci přechování

Níže uvedený výpočet, resp. sestrojený Haighův diagram (obr. 9.3), ukázal pro přechovací nástroj nekonečný počet pracovních cyklů. Potvrdil se tak předpoklad vysoké životnosti nástroje z hlediska mechanického namáhání. Na místě je úvaha, zda by nepostačoval materiál s nižšími hodnotami mechanických vlastností. Pro tento nástroj bude rozhodující velké tepelné namáhání a povrchové opotřebení. Do operace přechování, jakožto první operace, vstupuje materiál s největší teplotou.

Mechanické vlastnosti použité oceli 11 800 (při teplotě 200 °C)

$R_m = 780 \text{ MPa}$

$R_e = 330 \text{ MPa}$

Amplituda napětí σ_a [MPa]

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_a = \frac{70-0}{2} = 35 \text{ MPa}$$

σ_{\max} – maximální efektivní napětí [MPa], hodnota zjištěná pomocí aplikace QForm (obr. 8.1)

σ_{\min} – minimální efektivní napětí [MPa], pro mĳivý cyklus je hodnota σ_{\min} rovna nule

Střední napětí σ_m [MPa]

$$\sigma_m = \sigma_a = 35 \text{ MPa}$$

Časová mez únavy σ_c [MPa]

$$\sigma_c = \frac{R_e}{4} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_c = \frac{330}{4} = 82,5 \text{ MPa}$$

Dovolená mez únavy σ_u [MPa]

$$\sigma_u = \frac{\sigma_c}{k_c} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_u = \frac{82,5}{1,2} = 68,75 \text{ MPa}$$

k_c – koeficient bezpečnosti, $k_c \approx 1,0 - 1,4$ [-]

Mez únavy pro daný cyklus

$$\sigma_N = \sigma_u \cdot \sqrt[m]{\frac{N_\infty}{N}} \text{ [MPa]}$$

N_∞ – 10^7 cyklů

N – požadovaný počet cyklů [1]

m – konstanta, $m = 6 - 10$ [-]

$$\sigma_{N_\infty} = 68,75 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^7}{10^7}} = 68,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N_1} = 68,75 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^7}{10^5}} = 148,12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N_2} = 68,75 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^7}{10^4}} = 217,41 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N_3} = 68,75 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^7}{10^3}} = 319,11 \text{ MPa}$$

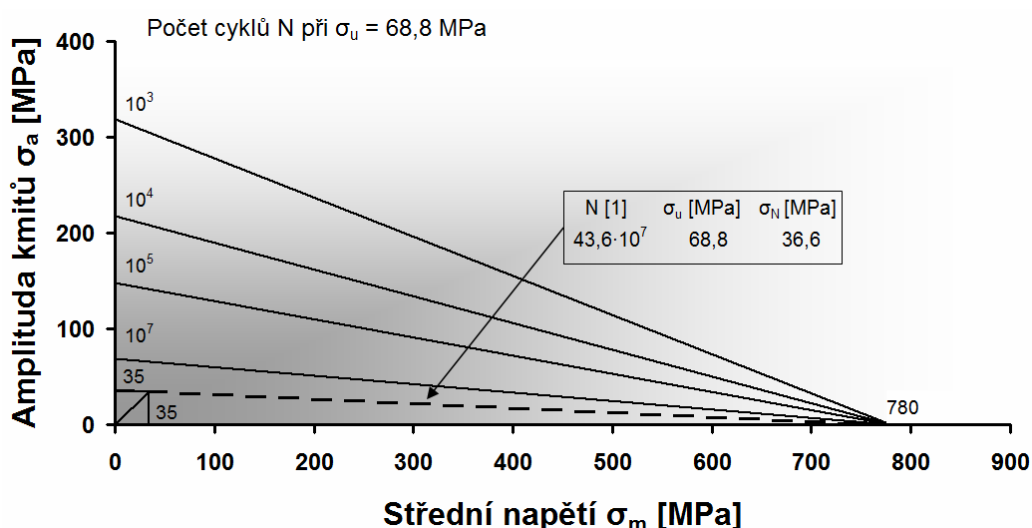
Mez únavy hledaného cyklu σ_N [MPa]

$$\sigma_N = \frac{\sigma_a \cdot R_m}{R_m - \sigma_m} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_N = \frac{35 \cdot 780}{780 - 35} = 36,64 \text{ MPa}$$

Dosažený počet cyklů N [1]

$$N = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_N} \right)^6 \cdot N_\infty = \left(\frac{68,75}{36,64} \right)^6 \cdot 10^7 = 43,64 \cdot 10^7 \text{ [1]}$$

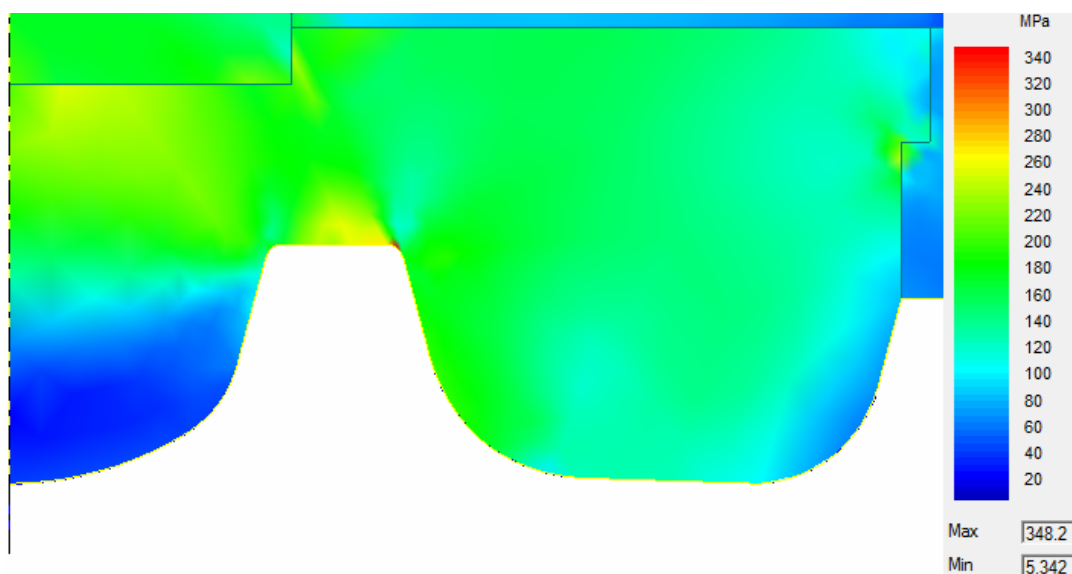


Obr. 9.3 Haighův diagram s odhadem životnosti zápustky pro operaci přechování.

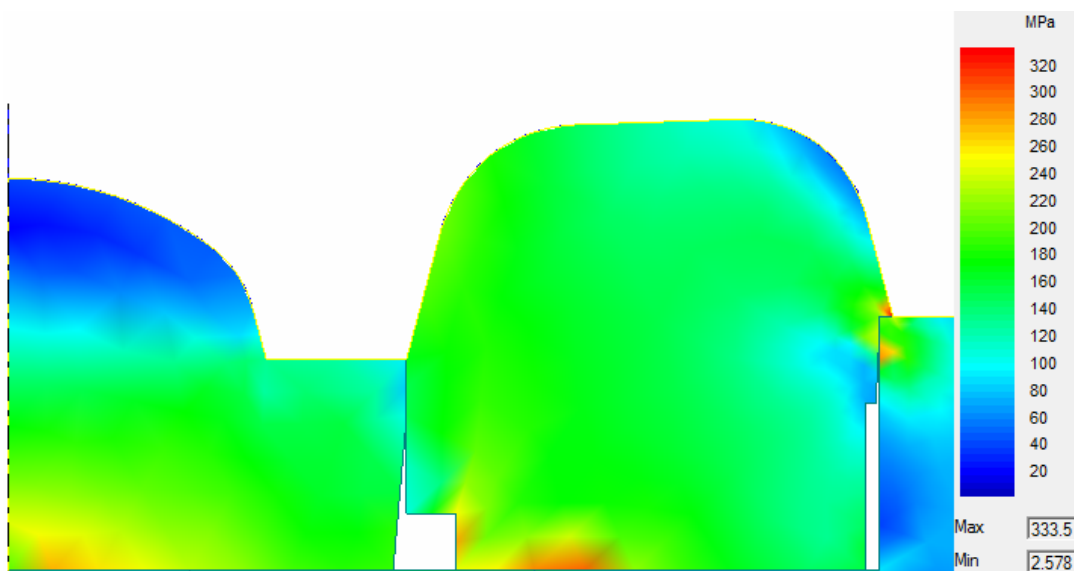
9.3 Odhad životnosti nástroje pro operaci tvarování

V operaci tvarování je nástroj ve srovnání s přechovacím nástrojem vystaven většímu efektivnímu napětí, což se projevilo na odhadovaném počtu pracovních cyklů. Haighův diagram na obr. 9.6 ukazuje pro tvarovací nástroj 8359 cyklů. Špičkové hodnoty efektivního napětí se objevují v oblastech vrubů komponentů nástroje (viz obr. 9.4, 9.5) a mírně překračují dovolené namáhání nástrojového materiálu. Pro výpočet potřebných hodnot k sestrojení Haighova diagramu byla použita maximální hodnota napětí v horní části nástroje (348 MPa). V dolní části nástroje je maximální hodnota napětí nepatrně nižší (334 MPa), což by znamenalo o několik pracovních cyklů více.

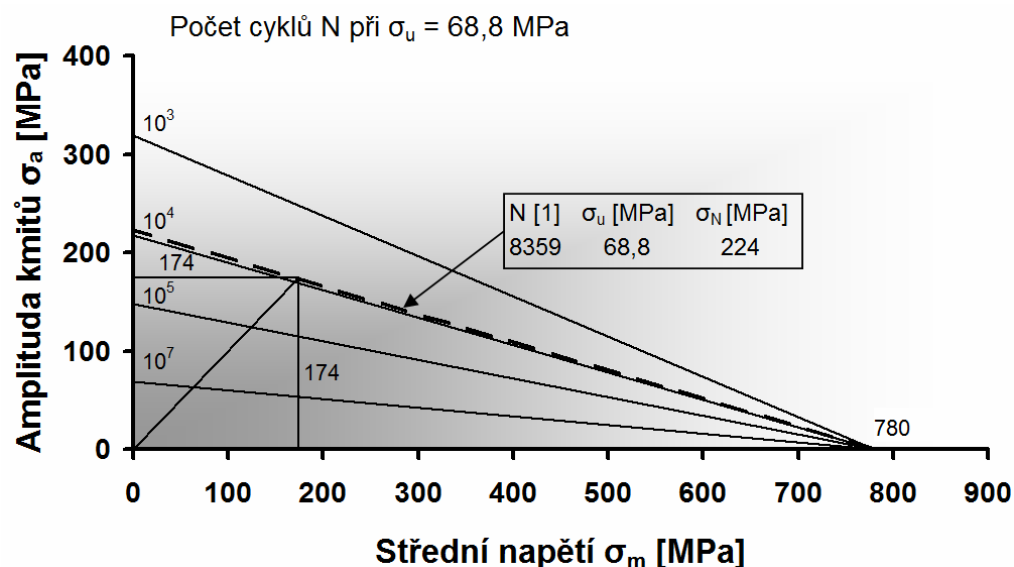
Roční produkce firmy BONATRANS GROUP a.s. je cca 60–80 tisíc kol pro nákladní dopravu. Při produkci 80 tisíc kol za rok by případná výměna komponentů nebo renovace zápusťky při vypočteném počtu cyklů proběhla desetkrát. S ohledem na překročení dovoleného namáhání je vhodnější zvolit pro žalud, horní a dolní tvarovací vložky nástrojový materiál s vyššími mechanickými vlastnostmi. Znamenalo by to vyšší počet pracovních cyklů a nižší počet oprav, případně výměn komponentů nástroje.



Obr. 9.4 Detail rozložení efektivního napětí [MPa] v horním dílu tvarovacího nástroje.



Obr. 9.5 Detail rozložení efektivního napětí [MPa] ve spodním dílu tvarovacího nástroje.



Obr. 9.6 Haighův diagram s odhadem životnosti zápusky pro operaci tvarování.

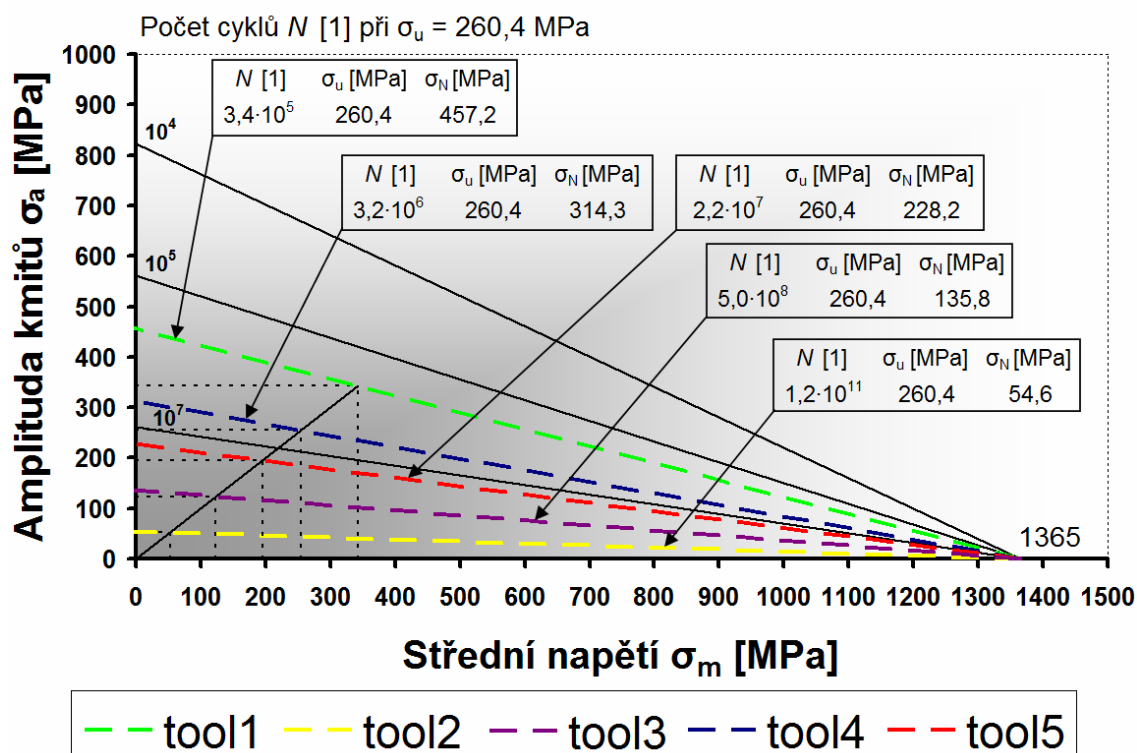
9.4 Odhad životnosti nástrojů pro operaci válcování

Při odhadu životnosti jednotlivých válců byly důležité hodnoty efektivního napětí a kontaktního tlaku. Z hlediska mechanické únavy a případného porušení materiálu má hlavní vliv efektivní napětí. Pro posouzení povrchového opotřebení a otěru nástroje byly směrodatné hodnoty kontaktního tlaku. Počty odhadovaných cyklů byly počítány pro jednotlivé válce z maximálních hodnot kontaktního tlaku a efektivního napětí. Haighovy diagramy pro mechanickou únavu a povrchové opotřebení jsou na obr. 9.7 a 9.8.

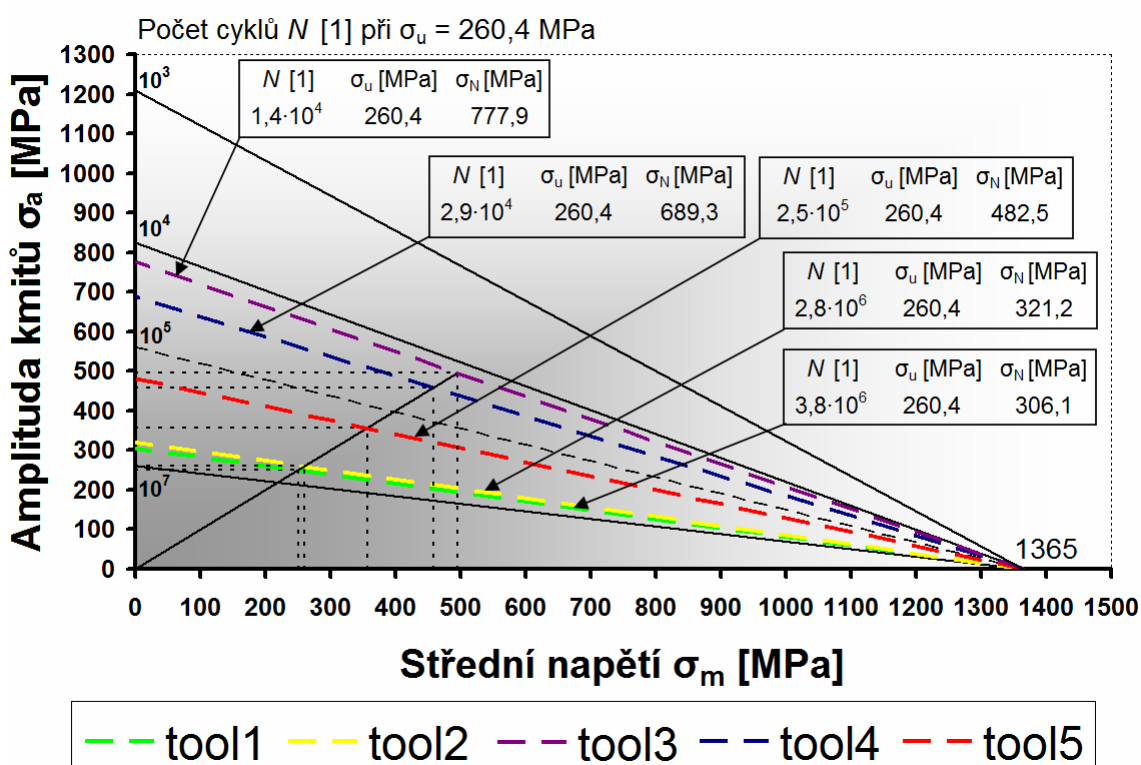
Z hlediska mechanické únavy je nejvíce namáhaný horní šikmý válec (tool1), o něco méně jsou namáhány tlačné válce (tool4, tool5) a nejmenší zátěž je kladena na hlavní válec (tool3) a dolní šikmý válec (tool2). Tomuto pořadí také odpovídají vypočtené hodnoty pracovních cyklů válců (obr. 9.7).

Při odhadu počtu cyklů válců s ohledem na povrchové opotřebení (obr. 9.8) vyšel nejmenší počet cyklů pro hlavní válec (tool3), větší počet cyklů mají tlačné válce (tool4, tool5) a nejvíce cyklů vyšlo pro šikmé válce (tool1, tool2).

Tab. 9.1 a 9.2 obsahuje přepočet odhadovaných cyklů jednotlivých válců na počty vyrobených kol. Při výpočtu je uvažováno, že jeden cyklus je roven jedné otáčce daného válce. Kolo se vyválcuje za 33 otáček, resp. 33 s. Pro tento čas se vypočtou odpovídající otáčky každého válce. Jestliže poté vydělíme počet odhadovaných cyklů daným počtem otáček válce, dostaneme předpokládaný počet vyrobených kol. Platí tedy úměra, že čím více máme vypočtených cyklů pro daný válec, tím více s ním také vyrobíme kol.



Obr. 9.7 Haighův diagram s odhadem životnosti válců z hlediska mechanické únavy.



Obr. 9.8 Haighův diagram s odhadem životnosti válců z hlediska povrchového opotřebení.

Tab. 9.1 Odhad počtu cyklů a vyrobených kol z hlediska mechanické únavy.

Nástroj	Počet cyklů N [1]	Počet vyrobených kol [ks]
tool1	$3,4 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^3$
tool2	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^9$
tool3	$5,0 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^7$
tool4	$3,2 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^4$
tool5	$2,2 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^5$

Tab. 9.2 Odhad počtu cyklů a vyrobených kol z hlediska povrchového opotřebení.

Nástroj	Počet cyklů N [1]	Počet vyrobených kol [ks]
tool1	$3,8 \cdot 10^6$	51 212
tool2	$2,8 \cdot 10^6$	37 735
tool3	$1,4 \cdot 10^4$	334
tool4	$2,9 \cdot 10^4$	313
tool5	$2,5 \cdot 10^5$	2700

10 Diskuse dosažených výsledků

Pro hodnocení životnosti nástrojů operace pēchování a tvarování za pomoci aplikace QForm bylo rozhodující rozložení efektivního napětí. Při tváření dochází k rozpínání jednotlivých komponentů složeného nástroje, což vede ke zvýšení nebezpečí iniciace trhlin a následnému porušení materiálu. Nástrojový materiál operace pēchování má značné rezervy. Hodnota dovoleného namáhání je skoro pětkrát vyšší než maximální efektivní napětí v nástroji. Rovněž hodnoty deformace obrysu nástroje vyšly v setinách milimetrů. Může tak být předpokládána dlouhá životnost pēchovací zápusťky. Zároveň nelze opomenout značné cyklické tepelné namáhání. V operaci tvarování dochází k výraznějšímu nárůstu hodnot efektivního napětí, které mírně překračují dovolené namáhání nástrojového materiálu. Také hodnoty deformace obrysu nástroje se pohybují již v desetinách milimetrů. Oproti operaci pēchování můžeme předpokládat nižší životnost nástroje a hrozí větší nebezpečí vzniku trhlin. Navrhují zvolit pro žalud, horní a dolní tvarovací vložky nástrojový materiál s vyššími mechanickými vlastnostmi.

U soustavy válců operace válcování bylo pro hodnocení mechanické únavy rozhodující rozložení efektivního napětí. Maximální hodnoty efektivního napětí válců jsou ve srovnání s dovoleným namáháním nástrojového materiálu nízké. Válců můžeme považovat za kompaktní tělesa a nehrozí u nich jako u zápusťek iniciace trhlin rozpínáním složeného nástroje. Nebezpečí bude pro ochlazované válce představovat vysoké cyklické tepelné namáhání a s tím spojené povrchové opotřebení nástrojů. Povrchového opotřebení válců bylo analyzováno na základě kontaktních tlaků. Vysoké kontaktní tlaky, které převyšují efektivní napětí i několikanásobně, budou iniciátory povrchových trhlinek. U tlačných válců a hlavního válce bude největší opotřebení na plochách a hranách, které formují okolek. Pro šikmé válce jsou kritické kuželové plochy, které pēchují vñec kola.

Odhadovaný počet cyklů jednotlivých nástrojů byl proveden pomocí Haighových diagramů. U operace pēchování ukázal Haighův diagram nekonečný počet cyklů a byl tak potvrzen předešlý předpoklad vysoké životnosti nástroje z hlediska mechanického namáhání. Na pēchovací nástroj bude mít hlavní vliv tepelné namáhání a povrchové opotřebení nástroje, což jistě povede k výraznému snížení počtu cyklů. Dle Haighova diagramu vyšlo pro tvarovací nástroj 8359 pracovních cyklů. Při roční produkci 80 tisíc kol by výměna komponentů nebo renovace zápusťky při vypočteném počtu cyklů proběhla desetkrát. Případná změna nástrojového materiálu žaludu, horní a dolní tvarovací vložky by znamenala vyšší počet pracovních cyklů a nižší počet oprav,

případně výměn komponentů nástroje. Pro válce operace válcování byly sestrojeny dva Haighovy diagramy. První je pro mechanickou únavu a vychází z efektivního napětí, druhý je pro povrchové opotřebení a vychází z kontaktního tlaku. První diagram ukázal vysoký počet cyklů všech válců. Z důvodu vyššího kontaktního tlaku vyšlo u druhého diagramu podstatně méně cyklů. Hlavním faktorem, který ovlivňuje životnost válců, je povrchové opotřebení. Největší povrchové opotřebení lze předpokládat u hlavního válce a tlačných válců. Nebezpečí mechanické únavy materiálu jsou nejvíce vystaveny tlačné válce a horní šikmý válec. Odhadované počty pracovních cyklů válců a jejich přepočty na množství vyrobených kol uvádí tab. 9.1 a 9.2.

11 Závěr

Výroba železničních kol představuje náročný technologický proces s řadou specifík. Jednoduchý špalek je za tepla přeměněn na několika strojích na tvarově složité kolo, přičemž musí být dodržen požadavek vysoké homogenity materiálu. Nevhodně zvolená technologie může způsobit tvarové a rozměrové úchytky kola a vést tak ke zmetkovitosti. V diplomové práci byly analyzovány operace přechování, tvarování a válcování. Hlavní pozornost však směřovala k operaci válcování, která mohla být díky novému modulu pro válcování kroužku a kol aplikace QForm 5.0 provedena jako 3D úloha tváření. Z hlediska přípravy vstupních dat simulace byla operace válcování nejobtížnější. Nastavení parametrů válcovací stolice a kinematiky soustavy válců bylo pro absenci potřebných dat značně ztíženo. Modul pro válcování kol rovněž neumožnil nastavení časově proměnných otáček válců.

Stěžejním úkolem práce byla analýza namáhání nástrojů a odhad jejich životnosti. Operace přechování se ukázala jako bezproblémová, nástrojový materiál má značné pevnostní rezervy. Pro tvarovací nástroj byl doporučen materiál s vyššími mechanickými vlastnostmi. Nástrojový materiál válců operace válcování je s ohledem na mechanické zatížení vyhovující. O případné renovaci či výměně válců rozhodne jejich povrchové opotřebení.

Aplikace QForm 2D/3D se ukázala jako účinný nástroj při rozboru jednotlivých simulovaných operací dané technologie a následném hodnocení životnosti nástrojů. Grafické zobrazení vyhodnocovaných veličin názorně ukazuje jejich rozložení na výkovku i nástroji, což bylo důležité pro zpracování celé práce. Výsledné poznatky mohou posloužit pro případnou úpravu technologie tak, aby probíhala efektivně a s maximální životností nástrojů. Obecné závěry mohou být rovněž využity při tváření podobných typů kol.

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. z katedry mechanické technologie VŠB-TU OSTRAVA za odborné vedení, cenné rady a obětavou pomoc při vypracování diplomové práce.

V Ostravě 21. května 2010

12 Seznam použitých pramenů

- [1] PETRUŽELKA, J. – HRUBÝ, J. A KOL. *Metoda konečných prvků ve tváření za tepla*. Sborník prací z grantu GAČR. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. ISBN 80-7078-636-1.
- [2] JANČAR, R. *Jak vzniká obutí pro nejrychlejší lokomotivu světa. Fotoreportáž. iDNES* [online]. 2008 [citováno 2010-01-20]. Dostupné z URL <<http://technet.idnes.cz>>.
- [3] BONATRANS GROUP a.s. *Webové stránky firmy Bonatrans* [online]. [citováno 2010-01-20]. Dostupné z URL <<http://www.bonatrans.cz/>>.
- [4] *QForm 2.1. Uživatelská příručka* [online]. Moskva: Quantor Ltd. 2000. [citováno 2009-04-24]. Dostupné z URL <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/QFORM_21_cz.pdf>.
- [5] JÍLEK, L. *Vývoj výroby železničních kol. Kovárenství*. 2009, č. 35, s. 25-29.
- [6] JANDA, J. – HÜBSCHER, R. A KOL. *Technologie výroby kolejových vozidel. Vysoká škola dopravy a spojov v Žilině*. Bratislava: ALFA, 1985.
- [7] HAŠEK, V. a kol. *Kování*. Vyd. I. Praha: SNTL, 1969.
- [8] HRUBÝ, J. *Metoda konečných prvků – 1. panel* [online]. [cit. 2010-04-20]. Dostupné z URL <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>.
- [9] BAREŠ, K. A KOL. *Lisování*. Praha: SNTL, 1971.
- [10] AFT GmbH. *Webové stránky firmy AFT* [online]. [citováno 2010-01-20]. Dostupné z URL <<http://www.presstrade.com>>.
- [11] *QForm 2D/3D 5.0. Uživatelská příručka*. Moskva: QuantorForm Ltd. 2008.
- [12] DOSTÁL, J. – HELLER, P. *Kolejová vozidla I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISNB 978-80-7043-520-5.
- [13] FÜRBACHER, I. *Lexikon ocelí: materiálové listy se zahraničními ekvivalenty*. Praha, 2006. ISBN 80-86897-12-5.
- [14] HRUBÝ, J. – PETRUŽELKA, J. – CARBOL, P. *Analýza životnosti tvářecích nástrojů*. VŠB-TU OSTRAVA, VUHŽ a. s. Dobrá, 2006.
- [15] FOREJT, M. *Teorie tváření a nástroje*. Brno: VUT BRNO, 1991. ISBN 80-214-0294-6.
- [16] LEINVEBER, J. – VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Vyd. II. Úvaly: ALBRA, 2005. ISBN 80-7361-011-6.
- [17] LONSDALE, C. – SWARTZELL, R. *Recent improvements in wrought railroad wheel production at Standard Steel* [online]. *Webové stránky firmy STANDARD STEEL*. [citováno 2010-01-20]. Dostupné z URL <<http://www.standardsteel.com/rdpapers/wroughtwheel.pdf>>.